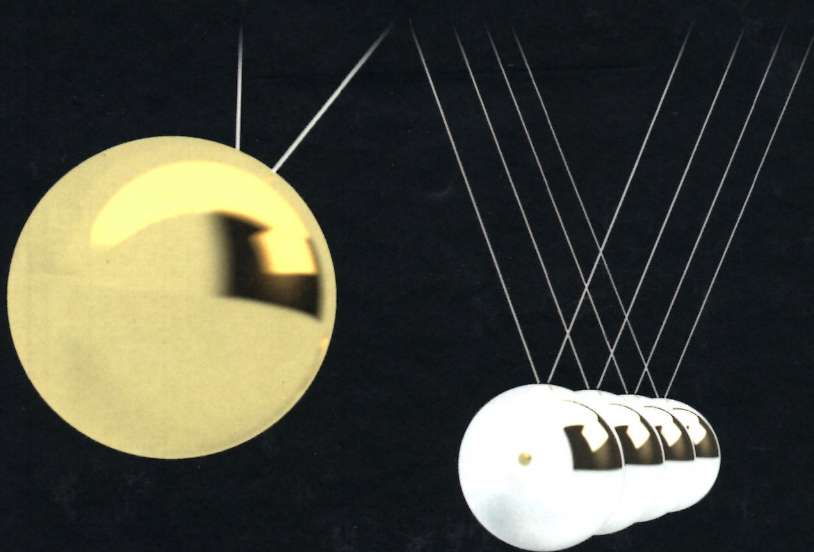
EL MÉTODO CIENTÍFICO

GALILEO

La naturaleza se escribe con fórmulas



NATIONAL GEOGRAPHIC

GALILEO GALILEI ocupó su vasto genio en tres empresas fundamentales. La primera y tal vez más conocida fue la observación astronómica, de la que resultaron descripciones asombrosas de las fases de Venus, los satélites de Júpiter, el relieve lunar o las manchas solares. La segunda fue el estudio de los cuerpos en movimiento, que le condujo a cuestionar la física aristotélica que había dominado el pensamiento occidental durante más de dos milenios. Pero la que dejó tras de sí una huella más profunda fue la defensa —aun a riesgo de morir en la hoguera— de una forma nueva de explicar el mundo, anclada en la evidencia empírica y el rigor matemático: el método científico.

EL MÉTODO CIENTÍFICO

GALILEO

La naturaleza se escribe con fórmulas

NATIONAL GEOGRAPHIC

ROGER CORCHO ORRIT es escritor y divulgador. Escribe sobre ciencia en medios escritos generalistas y en revistas especializadas. Es autor de diversos libros de texto y ha desarrollado parte de su carrera profesional en el mundo editorial.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 31b, 81a, 109ad, 141ai; Album: 38, 59, 109b, 141b; Archivo RBA: 37, 48, 61, 68, 75, 104, 127; Willem Blaeu: 68; Enzo de Bernardini: 142; Galileo Galilei: 135b; Domenico Fetti /Gemäldegalerie Alte Meister, Dresde, Alemania: 35; Frans Hals/Museo del Louvre, París: 24; Peter Lely/Universidad de Cambridge: 103; Ottavio Leoni/Biblioteca Marucelliana, Florencia: 31ai; NASA/JPL: 77, 109ai; Photoaisa: 31ad, 51, 55, 81b, 141ad; Joseph-Nicolas Robert-Fleury: 135a; Rafael Sanzio/Museos Vaticanos, Roma: 21; Smithsonian Institution Libraries: 41; Universidad de Ginebra: 64.

ISBN: 978-84-473-7630-8
Depósito legal: B 4506-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

En julio de 1971, cuando el astronauta David R. Scott, comandante de la misión Apolo 15, se encontraba sobre la superficie lunar, ejecutó un experimento sencillo pero de una gran trascendencia histórica: cogió un martillo y una pluma y los dejó caer simultáneamente desde una misma altura. Como resultado, ya esperado, ambos objetos se precipitaron al suelo al mismo tiempo, tal como se pudo apreciar en la grabación para la televisión estadounidense. «Galileo tenía razón», concluyó Scott con satisfacción, una vez finalizada la experiencia.

El propósito del astronauta en realidad no era otro que homenajear al físico visionario que había asentado las bases de la física y que había estudiado matemáticamente el movimiento. Un homenaje con diversas lecturas. Galileo había estudiado los astros celestes con su telescopio, y entre ellos las montañas y valles de la Luna. Y gracias a su conocimiento metódico de la realidad, también había asentado las bases para que fuera posible la explosión tecnológica que vivimos en la actualidad, que nos ha permitido, por ejemplo, construir cohetes como los de las misiones Apolo. Como señalaba Francis Bacon, coetáneo de Galileo, «Se domina la naturaleza obedeciéndola», y Galileo fue capaz de dar con las claves para poder obedecer y dominar sistemáticamente la naturaleza.

Galileo ocupa un espacio privilegiado en la historia del pensamiento por sus contribuciones en campos tan diversos como la

astronomía, la física o las matemáticas, e incluso por el valor literario de sus obras. Para empezar, está considerado como el primer científico en el sentido moderno. El mismo Albert Einstein le atribuyó este lugar de privilegio al asegurar: «Todo conocimiento sobre la realidad nace y acaba con la experiencia. Como Galileo observó esto, [...] él es el padre de la física moderna; en realidad, lo es de toda la ciencia moderna».

Hubo precedentes, entre los que brilla con luz propia Arquímedes, a quien Galileo consideraba como un maestro. El científico italiano aprovechó sus enseñanzas para conjugar, como nadie hasta entonces, las matemáticas con la observación y la experimentación. Proporcionó así una metodología que sería imitada hasta la saciedad, y cuya esencia supo capturar en una célebre metáfora: «La filosofía está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir, el universo, pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres con que está escrito. Está escrito en lengua matemática [...]». El método galileano «obligaba» a la naturaleza a procurar respuestas claras a los interrogantes planteados, sin enzarzarse en cuestiones filosóficas sobre las causas, respecto a las cuales nada se podía saber. Logró por tanto establecer con la naturaleza el diálogo fecundo al que siempre había anhelado la humanidad. La introducción del método científico constituyó una novedad histórica y la vía para establecer el conocimiento.

Los experimentos de Galileo lanzando bolas sobre planos inclinados y los experimentos actuales con los aceleradores de partículas solo presentan una diferencia de grado. Entre ellos existe un aire familiar; comparten la misma esencia de diálogo en marcha, basado en la creación de condiciones artificiales que sean reproducibles infinidad de veces para poner a prueba las hipótesis formuladas.

Además de dar un vuelco metodológico, Galileo contribuyó como nadie a derribar el antiguo sistema del mundo basado en el geocentrismo, y sustituirlo por el heliocentrismo. Cuando Galileo Galilei nació, la idea común era concebir el universo como una esfera finita y cerrada, estructurada en capas concéntricas, con la Tierra en su centro. Era un cosmos ordenado frente al cual Copér-

nico había propuesto una concepción alternativa, el heliocentrismo, consistente en situar el Sol en el centro del universo y el resto de planetas, incluida la Tierra, orbitando a su alrededor. Galileo logró, con sus razonamientos y observaciones, rebatir cualquier argumento en contra del heliocentrismo y que una idea tan difícil de aceptar como el movimiento terrestre fuera tomada como una realidad. El personaje que tan activamente participó en derribar el antiguo sistema del mundo, que durante veinte siglos había dominado el pensamiento humano, acabó siendo vencido no por la fuerza de los argumentos, sino por el dogmatismo y la intolerancia. Su derrota fue en realidad un triunfo, ya que gracias a sus aportaciones, ese cosmos geocéntrico pasaría a ser una imagen que formaría parte del pasado para las siguientes generaciones, arrumbada por la nueva concepción del mundo.

Su principal arma contra el geocentrismo fue el telescopio. Aprovechó la propiedad de las lentes para agrandar los objetos, descubierta en los Países Bajos, para estudiar los cielos. Un panorama infinito se abrió ante sus ojos —las estrellas de la Vía Láctea, por ejemplo, se multiplicaron— y el universo repentinamente se llenó de nuevos objetos. Galileo tuvo el gran privilegio de contemplar por vez primera los satélites de Júpiter, las manchas del Sol o las montañas de la Luna, y tales descubrimientos los dio a conocer en libros como *El mensajero sideral*, uno de los grandes éxitos de ventas de la época —aunque hay que tener en cuenta que las tiradas de cada edición eran de quinientos ejemplares— y que está considerado como el libro más influyente del siglo XVII. Con esa obra, el científico italiano fue capaz de crear un público para la ciencia, ansioso de conocer las novedades y los nuevos descubrimientos sobre el funcionamiento de la naturaleza y del universo.

Su fama se extendió por toda Europa, sobre todo por los salones de la realeza, al igual que sus libros o que la noticia de sus descubrimientos. Y frente a los que rechazaban sus descubrimientos, Galileo no dudaba en acarrear su telescopio para invitar a cualquiera a mirar. La observación, antes que cualquier razonamiento ingenioso, era el mejor instrumento para convencer a los indecisos.

Históricamente, la época en que vivió Galileo se conoce como Revolución Científica, y se identifica con los siglos XVI y XVII. En

ese período tuvo lugar una abrupta ruptura con el pasado —aunque algunas ideas estuvieran ya latentes en autores previos—, a partir de la cual la ciencia surgiría como una actividad desmarcada de la tradición de la filosofía natural. Galileo fue uno de los científicos más representativos de la época y el que mejor encarnaba los valores de esa revolución. No estaba solo; en su compañía cabe citar a otros astrónomos y matemáticos que contribuyeron a impulsar el heliocentrismo y a sentar las bases del pensamiento científico moderno. Se trata de autores cuyas aportaciones configuran una época gloriosa, como Copérnico —que antecedió a todos y puso en marcha un movimiento imparable, como si se tratara de piezas de un dominó—, Tycho Brahe, Kepler o el filósofo Giordano Bruno, que acabó en la hoguera por defender ideas heréticas como la infinitud del universo. Ese mismo destino cruel pendió como una amenaza sobre las cabezas de todos los participantes en este proceso, principalmente sobre la de Galileo, que era la punta de lanza.

Hay unanimidad en considerar a Isaac Newton como el momento culminante de la Revolución Científica, pues fue capaz de crear una nueva física, podríamos decir una física completa, terminada. Con la ley de la gravedad, Newton unificó lo que hasta ese momento se pensaba que eran dos mundos regidos según principios físicos distintos: por un lado, el mundo perfecto de los astros, y por otro, el mundo terrestre de la generación y la corrupción. Es decir, sus leyes se aplicaban tanto al movimiento de las manzanas al caer de los árboles como al de la Luna al girar en torno a la Tierra. Pero como aseguró el propio Newton, su obra solo se puede explicar porque se subió «a hombros de gigantes». Entre estos gigantes se encontraba, sin ningún género de dudas, Galileo. En su última obra, *Discursos y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias*, Galileo inauguró la ciencia del movimiento o cinemática: puso las bases para el estudio del movimiento uniforme y del movimiento uniformemente acelerado, y logró establecer acertadamente la trayectoria parabólica de un proyectil. Sobre el movimiento también destacan sus reflexiones sobre el principio de inercia, que luego Newton encumbraría como primera ley, es decir, como la noción más fundamental.

Todos los estudiantes se inician actualmente en la física con las ideas, conceptos y experimentos adelantados por Galileo.

«Atrévete a saber» *(sapere aude)* era el lema que para el filósofo Immanuel Kant sintetizaba mejor la Ilustración. Sirve también para definir el espíritu que animaba a Galileo y que impregnaba todos sus actos. En su atrevimiento, no dudó en enfrentarse a la autoridad, se llamara esta Aristóteles o bien Iglesia. En el choque con el pensamiento institucional, Galileo puso su talento al servicio de la búsqueda de todo tipo de recursos argumentativos dirigidos a convencer a los escépticos. Plantó cara y se enfrentó a un poder para el cual constituía una amenaza. En ese combate por la verdad y la libertad, Galileo defendió que la verdad no tenía por qué hallarse necesariamente en los libros señalados por la tradición.

La Iglesia humilló a Galileo obligándolo a retractarse. Sin embargo, ya en pleno siglo XX, el papa Juan Pablo II decidió reabrir su caso. La comisión que se organizó para reexaminar el proceso judicial que condenó a Galileo concluyó que dicha condena había sido injusta. Esa rectificación contrastaba con el autoritarismo y el control asfixiante que las autoridades eclesiásticas habían ejercido sobre la sociedad del Renacimiento.

La ciencia se ha caracterizado por ir resituando al ser humano en posiciones cada vez más irrelevantes en el gran escenario del universo. La tesis heliocéntrica constituyó la primera gran humillación para la humanidad (dado que la Tierra, ni por tanto el ser humano, ocuparían el centro del todo), a la que seguirían otras, como la teoría de la selección natural de Darwin. La resistencia a aceptar este papel irrelevante para el ser humano ha sido una de las constantes que han acompañado el desarrollo de la ciencia y es donde cabe situar la polémica en torno al movimiento de la Tierra.

Galileo no solo está considerado uno de los grandes científicos de todos los tiempos, sino que también es uno de los mejores escritores italianos. La elección de la lengua para escribir sus libros no fue un asunto baladí. El latín era la lengua culta y la que empleaban los eruditos para publicar sus comentarios y análisis. En realidad, eso dificultaba en gran manera que el pueblo llano pudiera acceder al mundo intelectual y a adquirir conocimientos. Las capas menos pudientes de la sociedad eran indignas de unos

conocimientos que solo podían estar al alcance de unos pocos privilegiados. Galileo, por el contrario, entendió claramente que para que sus ideas triunfaran tenían que ser conocidas. Lo hizo con una brillantez inigualable, hasta el punto de que algunos de sus libros —como el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo: ptolemaico y copernicano*— forman parte tanto de la historia de la ciencia y la filosofía como de la literatura universal.

Las discusiones astronómicas hace tiempo que dejaron de ocuparse sobre qué astro se sitúa en el centro del universo. Hoy en día, los debates se refieren, por ejemplo, a la existencia de materia oscura o de energía oscura, o bien aluden a horizontes mucho más lejanos, como la posibilidad de que exista una infinidad de universos más allá del nuestro. Los experimentos se han sofisticado y cada vez más aspectos de la realidad se someten al escrutinio metódico de la ciencia. Telescopios como el *Hubble* han permitido captar imágenes inimaginables hasta su lanzamiento. Ya se están descubriendo millones de planetas como el nuestro. Galileo fue el científico que puso los cimientos para que este despliegue y festín del conocimiento que constituye nuestra época fuera posible.

1564 Galileo Galilei nace en Pisa, Italia, el 15 de febrero. Fue el mayor de los siete hijos de Vincenzo Galilei.

1581 Inicia estudios de Medicina en la Universidad de Pisa. Cuatro años más tarde abandona la universidad sin obtener ninguna titulación.

1588 Se postula como profesor de Matemáticas en la Universidad de Bolonia, pero fracasa en su intento. Un año más tarde obtiene la plaza en la Universidad de Pisa. Redacta *De motu*.

1591 Muere su padre. Galileo tiene que hacerse cargo de su familia.

1592 Se traslada a la Universidad de Padua. Además de su labor docente, da clases particulares y trata de vender sus inventos para hacer frente a sus gastos.

1600 Con Marina Gamba, y fuera del matrimonio, Galileo tiene su primera hija, Virgina, que luego será sor Maria Celeste. Un año después nace Livia, y seis años después, su hijo Vincenzo.

1609 Construye un telescopio y lo presenta ante el senado veneciano.

1610 Galileo descubre cuatro de los satélites de Júpiter. Escribe *Mensajero sideral*. Es nombrado filósofo y matemático de Cosme II de Médici. Descubre unas formas alrededor de Saturno, aunque no las identifica como anillos.

1613 Publica *Historia y demostraciones en torno a las manchas solares*, donde argumenta que las manchas están en el propio Sol. También escribe *Cartas a Castelli*, que se ampliarán con *Carta a Cristina de Lorena*, cuya difusión causa gran malestar entre los teólogos.

1615 El carmelita Paolo Foscarini defiende que la teoría copernicana no contradice la religión. Galileo es denunciado ante la Inquisición.

1623 Publica *El ensayador*, una exposición sobre el método científico.

1624 Galileo recibe permiso del papa Urbano VIII para exponer, de forma hipotética, la teoría copernicana.

1632 Publica *Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo: ptolemaico y copernicano*. A los pocos meses la Inquisición lo condena a cadena perpetua, pena conmutada por un arresto domiciliario a perpetuidad.

1634 Muere su hija sor Maria Celeste.

1638 Publica *Discursos y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias*, libro que establece los fundamentos de la física moderna.

1642 Muere el 8 de enero en la villa de Arcetri, a los setenta y siete años de edad.

CAPÍTULO 1

El método de la ciencia

La actividad científica se caracteriza por recurrir a experimentos y observaciones, y por tratar de sistematizar las uniformidades de la naturaleza mediante leyes matemáticas. Esta forma de trabajar configura una metodología cuyo principal propulsor fue Galileo Galilei. A caballo entre los siglos XVI y XVII e inspirándose en figuras como Arquímedes, Galileo dialogó con la naturaleza tal como lo haría un científico de nuestro tiempo, oponiéndose a los métodos usuales de la época, basados principalmente en la obra de Aristóteles.

«Abjuro, maldigo y detesto los antedichos errores y herejías y, en general, todo error, herejías y secta contrarios a la Santa Iglesia.» Con estas rotundas palabras, el astrónomo y matemático Galileo Galilei se retractó, ante el tribunal de la Inquisición, de las ideas copernicanas y de sus dos tesis principales, según las cuales el Sol se encontraba en el centro del universo, y la Tierra, convertida en un planeta más, estaba en movimiento girando a su alrededor.

Esto pasaba en 1633, cuando Galileo era ya un anciano enfermo de sesenta y nueve años, y supuso una humillación que le permitió conservar la vida y evitar la cárcel, conmutada por un arresto domiciliario que no le impidió ni trabajar ni recibir visitas.

Las ideas de Galileo se estrellaron contra el muro de ignorancia e intolerancia de las instituciones, principalmente eclesiásticas. Que el papa obligara a postrar de rodillas a Galileo no sirvió de nada: en las generaciones venideras, la visión del mundo defendida por el científico pisano se impondría sin discusión.

El episodio frente a la Inquisición podía haber sido el capítulo final de una vida desbordante de desafíos y discusiones. No fue así. Con artritis, y dificultades en la visión que acabarían por dejarlo ciego, aprovechó el arresto en la villa de Arcetri, cercana a Florencia, para escribir un nuevo diálogo, *Discursos y demostraciones matemáticas, en torno a dos nuevas ciencias*, en el que fundaría la nueva ciencia del movimiento. Al inicio de la jornada

tercera de ese diálogo, Galileo enuncia sus principales descubrimientos y concluye:

> Que ambas cosas son así [sobre el movimiento uniformemente acelerado y la trayectoria parabólica de los proyectiles] lo demostraré, junto con otras muchas cosas no menos dignas de conocerse. Y, lo que es más importante, se abrirá el acceso y la entrada a una ciencia vastísima e importantísima de la que estos nuestros trabajos constituirán los rudimentos, y en la que ingenios más perspicaces que el mío penetrarán los secretos más ocultos.

Galileo sabía que su obra tenía un carácter inaugural y sería seguida por el trabajo de otros científicos. Con la publicación de los *Principia Mathematica* de Isaac Newton medio siglo después —obra deudora directa del libro de Galileo— se confirmaría con brillantez la intuición del sabio. Hoy en día, los resultados obtenidos por Galileo sobre el movimiento acelerado siguen introduciendo a los estudiantes a la física.

«Una nueva verdad científica no triunfa por convencer a sus oponentes [...] sino porque los oponentes terminan muriéndose.»

— **Max Planck, en referencia a las dificultades con las que se encuentran las nuevas ideas para germinar.**

¿Por qué se sintió la Iglesia católica amenazada por las enseñanzas de un matemático? En la acusación presentada por la Inquisición se hace referencia a una causa directa: la defensa del movimiento de la Tierra por parte de Galileo, que contradice algunos pasajes de la Biblia en los que se habla de una Tierra inmóvil. Al cuestionar una creencia que para los teólogos constituía una cuestión de fe, acabó siendo acusado de herejía. Sin embargo, su enfrentamiento con la Iglesia tenía raíces más profundas porque cuestionaba el papel que se había arrogado la Iglesia en la gestión de la verdad. Galileo replanteó la noción misma de conocimiento y los procedimientos válidos para alcanzarlo. Aquí se encuentra la raíz subversiva del pensamiento galileano, que lo enemistó con

teólogos y personalidades con poder que acabaron por obligarlo a ponerse de rodillas por su atrevimiento.

El historiador Alexandre Koyré (1892-1964) también apunta al carácter revolucionario de la obra de Galileo, sobre quien asegura que no pretendía «combatir unas teorías erróneas, o insuficientes, sino transformar el marco de la misma inteligencia, trastocar una actitud intelectual, en resumidas cuentas muy natural, sustituyéndola por otra, que no lo era en absoluto».

La teología cristiana, encabezada por Tomás de Aquino (1224/1225-1274), había fusionado la verdad bíblica —considerada revelada e indudable— con la reflexión filosófica aristotélica, adaptando y reelaborando aquellas tesis que entraran en contradicción. Sustituyó, por ejemplo, la creencia en la eternidad de la naturaleza defendida por Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.) por la creación del universo tal como se relata en el Génesis. Como resultado, se desarrolló una cosmovisión completa y capaz de dar respuesta a cualquier cuestión sobre la realidad, por compleja que fuera, gracias a su frondoso aparato conceptual. Aristóteles y la Biblia constituían, por tanto, el suelo intelectual —un suelo firme y por otro lado perfectamente estéril— que Galileo tuvo que erosionar para plantear sus métodos opuestos.

EL CONOCIMIENTO SEGÚN ARISTÓTELES

Aristóteles no solo lo quiso explicar todo, sino también definir cuáles eran las buenas explicaciones, qué es el conocimiento y cómo se puede alcanzar. Identificó lo particular y lo concreto —aquello que se capta por los sentidos— como el origen del conocimiento, el trampolín que permitiría ascender hasta lo universal, que es donde residiría el auténtico conocimiento. Gracias a la abstracción, los seres humanos seríamos capaces de captar la esencia común a un conjunto de individuos u objetos, lo que nos permitiría identificarlos como miembros de una misma especie. Aristóteles, por tanto, no rechazó la observación, antes al contrario, la convirtió en el fundamento de su ciencia. Se trataba de una fortaleza y también

de una debilidad: la ciencia moderna nació cuando se comprendió que el conocimiento se tenía que fundar en principios alejados del sentido común, como el principio de inercia. El sentido común y los datos de los sentidos condujeron de hecho a errores (por otro lado inevitables), como creer que la Tierra está inmóvil.

El proceso de descubrimiento consistiría, para Aristóteles, en pasar de lo particular a lo general, es decir, en la inducción. El sabio capaz de dar este paso era también aquel capaz de descubrir las causas y los principios de los eventos. Ascender por el entramado causal —con sus cuatro causas: eficiente, formal, material y final— permitía alcanzar un conocimiento universal e infalible sin posibilidad de error, pretensión vana, habida cuenta de que, tal como señaló posteriormente Galileo, toda la cosmovisión aristotélica basada en esferas cristalinas no era más que invención y fantasía.

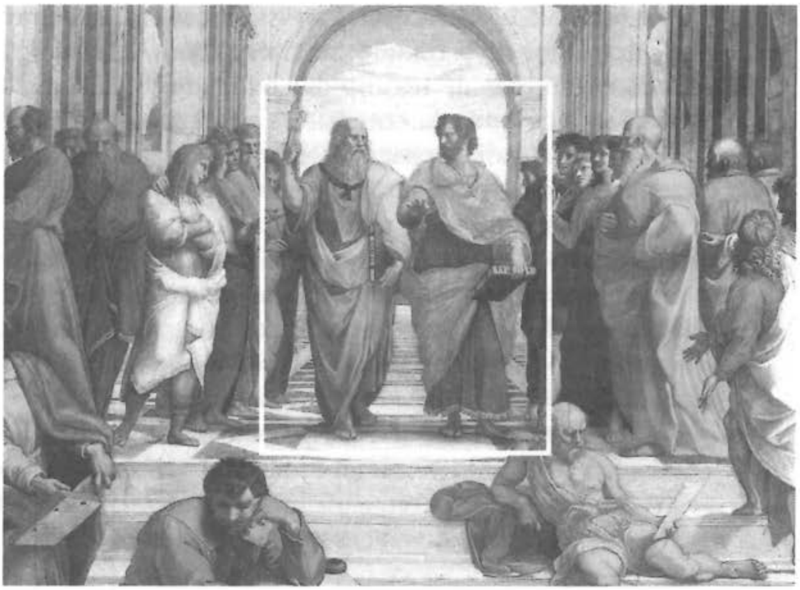
Para presentar los resultados de una investigación, Aristóteles era partidario de usar la deducción y los silogismos. De esta manera, las conclusiones de los razonamientos se demostraban, presentaban y enseñaban de forma irrefutable y necesaria, con una contundencia que no daba pie a la duda ni contemplaba otras opciones. Con la deducción era posible aplastar cualquier alternativa, hasta llegar a ser un arma capaz de monopolizar el mundo del saber.

Aristóteles consideraba que las matemáticas ayudan al estudio de cualidades que se encuentran en los objetos —como calcular sus dimensiones—, pero solo permiten alcanzar un conocimiento cuantitativo y accidental, jamás permiten remontarse a la sustancia, ni alcanzar lo universal. La ciencia aristotélica —mejor adaptada a la biología que a la física— era cualitativa y conceptual. Hasta el Renacimiento, el estudioso de la naturaleza era conocido como filósofo natural, un erudito que no requería de matemáticas para tratar de establecer un conocimiento sobre el mundo, sino que tenía suficiente con pertrecharse con el aparato conceptual aristotélico.

Otra característica del pensamiento aristotélico era su desdén por el conocimiento técnico, es decir, por aquel que no se elevaba hacia las causas y los principios, sino que prefería quedarse a ras de suelo, la experiencia práctica basada en el ensayo y error. Se trataba de un conocimiento de lo concreto que no era propio de sabios, sino de artesanos.

DOS CONCEPCIONES DIFERENTES

El gran pintor renacentista Rafael Sanzio (1483-1520) visualizó en *La Escuela de Atenas* (1510-1512) las diferencias que separaban a los dos grandes maestros de la Antigüedad, Platón (428/427 a.C.-347 a.C.) y Aristóteles. Este fresco representa la investigación racional de la verdad, algo muy del gusto del Renacimiento. Ambos personajes aparecen en la posición central del cuadro, Platón sosteniendo el *Timeo* y levantando el dedo hacia el cielo, y Aristóteles con el volumen de la *Ética* en su mano y tendiendo hacia delante el brazo con la palma de la mano vuelta al suelo. En los gestos de ambos filósofos está sintetizada la esencia de sus doctrinas según un procedimiento típico de Rafael, que logra concretar en imágenes simples las más complejas ideas, pues Platón señala hacia arriba porque representa al mundo de las Ideas, y Aristóteles señala hacia el suelo por su realismo. Así, Platón mostraba su desprecio por el mundo de sombras que le rodeaba, y apuntaba a un más allá donde residirían las formas eternas. Aristóteles, por el contrario, señala precisamente a ese mundo, porque es a partir del cual comienza el conocimiento.



Detalle de *La Escuela de Atenas*, de Rafael, en el cual se ha destacado la pareja central formada por Platón, a la izquierda, y Aristóteles.

BACON, DESCARTES, GALILEO

Frente a la estéril tradición culta encerrada en las universidades y su élite de profesores alejados de los objetos que pretendían estudiar, durante el Renacimiento surgió un creciente interés por lo que estaba ocurriendo fuera de las aulas, como por ejemplo en los talleres artesanos. Allí se elaboraban y pulían lentes, se manipulaban y fundían metales, y se observaban algunas características sorprendentes, como es el caso de los imanes (sobre los que Galileo también se interesó). Se estaban descubriendo numerosas propiedades que hasta ese momento habían permanecido ignoradas.

> «Cuando la filosofía se desgaja de sus raíces en la experiencia, donde brotó y creció, se vuelve algo muerto.»
>
> — Francis Bacon.

Los artesanos se encontraban en posesión de un gran conocimiento en bruto, y cuando esos tesoros de información despertaron el interés de los estudiosos, pudieron sistematizarse, publicarse y, de esta manera, darse a conocer al gran público.

Aunque Aristóteles seguía teniendo la misma vigencia para trazar la ruta intelectual de todo aspirante a sabio y humanista, el descubrimiento de nuevos materiales y el estudio de nuevos fenómenos observados por los artesanos acabó por convencer a los intelectuales de que era necesario poner en cuestión el legado aristotélico. De forma casi simultánea, aparecieron tres pensadores que cuestionaron, de forma independiente, sus presupuestos, planteamientos y conclusiones: se trataba del inglés Francis Bacon, el francés René Descartes y el italiano Galileo Galilei. Tales autores constituyeron un frente común contra Aristóteles, aunque centraron sus críticas en matices y aspectos diferentes.

BACON

Francis Bacon (1561-1626), por ejemplo, criticó el desprecio de Aristóteles por el conocimiento artesanal y afirmó que la separa-

ción de la tradición culta y la artesanal «ha introducido la confusión en todos los asuntos de la familia humana». También reprochó a los seguidores de Aristóteles que se dedicaran exclusivamente a defender deductivamente sus tesis y se olvidaran del contacto con la realidad (algo con lo que el propio Aristóteles no habría estado de acuerdo).

Para Bacon, la experiencia ofrece datos crudos y caóticos, pero su acumulación proporciona una suerte de progreso. La filosofía natural, en cambio, resplandece cegadoramente en sus orígenes, pero eso mismo impide cualquier desarrollo posterior:

> Con sus primeros autores, las artes mecánicas resultan crudas, toscas y caóticas, pero van adquiriendo nueva fuerza y capacidades. La filosofía es más vigorosa con sus primitivos autores mostrando luego una subsiguiente degeneración. La mejor explicación de tan opuestas fortunas es que en las artes mecánicas los talentos se combinan para producir un resultado único, mientras que en filosofía un talento individual destruye varios.

Bacon, por tanto, está cuestionando la diferencia entre ciencia y técnica, entre conocimiento seguro de causas y conocimiento práctico basado en ensayo y error.

DESCARTES

René Descartes también reivindicó la libertad de pensamiento y la necesidad de prescindir de la autoridad para llegar a alcanzar la verdad. Aspiró a pensar por sí mismo mediante un método de conocimiento racionalista que sirviera para asentar de manera indudable todo conocimiento. El conocimiento tenía que fundarse en intuiciones evidentes, claras y distintas, y en el análisis y la síntesis de los problemas. Combinó este sostén filosófico con una firme apuesta por la matematización de la realidad (no está de más recordar que su celebérrimo *Discurso del método* no era más que el prefacio a unos artículos de geometría y física matemática).

Descartes, sin embargo, se siguió aferrando a la búsqueda de las causas como la auténtica vía de conocimiento, y reprochó a Galileo haberse desentendido de esa búsqueda. En una carta, Descartes señala que «[Galileo] filosofa bastante bien sobre el movimiento, pero construye sin fundamentos». Galileo, por el contrario,

RENÉ DESCARTES



De familia noble, Descartes (1596-1650) nació en La Haya (en la provincia francesa de Turena) y estudió en el colegio jesuita Henri IV de La Flèche, donde aprendió matemáticas y adquirió una notable cultura clásica, al mismo tiempo que se familiarizó con la filosofía escolástica, de la que acabó defraudado por la disparidad de conclusiones que alcanzaban los distintos autores. Se alistó en el ejército de Mauricio de Nassau (1567-1625) para participar en la Guerra de los Treinta Años y durante un invierno, encerrado en una habitación junto a una estufa, tuvo tres sueños seguidos de encontrar un método que permitiera establecer un conocimiento verdadero del mundo, del mismo modo que se logra la certeza en matemáticas. Tras abandonar la carrera militar, se dedicó a viajar y vivió en diversos países europeos, como Dinamarca, Alemania, Francia, Italia, pero finalmente se afincó en París, donde vivió unos cuantos años y se dedicó a elaborar su método (descrito en su obra *Discurso del método*, que no publicaría hasta 1637 en los Países Bajos, país al que se trasladó por su tradición mucho más tolerante). Llegó a defender en una obra el heliocentrismo, pero la dejó sin publicar por la cercanía de la condena a Galileo. En los Países Bajos escribió algunas de sus obras principales, como *Meditaciones metafísicas* (1641), *Principios de filosofía* (1644) y *Tratado de las pasiones* (1649). La reina Cristina de Suecia solicitó en ese momento sus servicios como tutor, pero Descartes, que siempre había tenido una salud débil, no resistió la dureza del invierno sueco y falleció.

pensaba que las causas —como la de la aceleración en un cuerpo en caída libre— son «como fantasías».

GALILEO

Frente a los aristotélicos y teólogos, Galileo desacreditó firmemente el *Magister dixit*, argumento de autoridad que esgrimían con asiduidad los profesores y colegas de profesión para refutar sus observaciones. Para Galileo, la autoridad no podía ser un argumento serio:

> Me parece, por lo demás, que Sarsi tiene la firme convicción de que para filosofar es necesario apoyarse en la opinión de cualquier célebre autor, de manera que si nuestra mente no se esposara con el razonamiento de otra, debería quedar estéril e infecunda; tal vez piensa que la filosofía es como las novelas, producto de la fantasía de un hombre, como por ejemplo la *Ilíada* o el *Orlando furioso*, donde lo menos importante es que aquello que en ellas se narra sea cierto.

Mientras que los aristotélicos recurrían sistemática y ciegamente a la autoridad, Galileo tenía la convicción de que esta actitud no era la que había defendido el propio Aristóteles, que fue un gran observador de la naturaleza y realizó notables descubrimientos en campos como la zoología:

> Si Aristóteles hubiese sido como [sus discípulos] se imaginan, sería un cerebro indócil, un espíritu obstinado, un alma llena de barbarie y un tirano que, considerando a los demás como ovejas estúpidas, desearía que se antepusiesen sus propios decretos a los sentidos, a la experiencia y a la propia naturaleza. Son sus seguidores los que le han investido de esa autoridad y no él quien se la ha atribuido o usurpado.

El argumento de autoridad era una coraza inexpugnable, frente a la que no servían para nada los hechos. Esa cerrazón

obligó a Galileo a defender sus convicciones en numerosas controversias, por lo que se ganó numerosas enemistades. En una carta a Cristina de Lorena, Galileo aludía a estas agrias reacciones «como si yo con mis propias manos hubiese colocado tales cosas en el cielo para enturbiar la naturaleza y las ciencias». Pero no eran invenciones: Galileo había descubierto los satélites girando alrededor de Júpiter, con lo que rechazaba el dogma aristotélico según el cual todos los cuerpos celestes giraban alrededor de la Tierra; además, todo aquel que quisiera mirar podría ver que el sistema aristotélico no se adecuaba a la realidad.

Otra forma de oposición y rechazo de sus descubrimientos y observaciones era de carácter puramente formal y de definición. Se usaban «argumentos lógicos, como si fuesen sortilegios mágicos», diría burlándose Galileo en una carta a Kepler, incapaz de comprender que con meras palabras no era posible disolver las evidencias. El lenguaje carece de poderes mágicos capaces de restituir un orden que solo existía en la imaginación de sus oponentes. Galileo también se refirió a la insustancialidad de la retórica cuando acusó a aristotélicos y otros filósofos naturales de usar conceptos vacíos como si creyeran que el nombre hace a la cosa (de forma irónica plantearía la misma cuestión al bautizar como Simplicio al más simplón de los participantes en sus diálogos) o de pensar que las palabras pueden tener efecto en la realidad, en vez de ser meros instrumentos de comunicación:

> Pues si su voluntad y su voz son tan potentes como para dar el ser a las cosas queridas y nombradas por ellos, les suplicaría que me hicieran la gracia de querer y nombrar como oro a muchos hierros viejos que tengo por la casa.

Para Galileo, los aristotélicos son capaces de negar «todas las observaciones y experiencias del mundo y rehusarían incluso el verlas, por no tener que reconocerlas, y dirían que el mundo es tal como dice Aristóteles, no tal como quiere la naturaleza; pues privados del apoyo de esta autoridad, ¿cómo van a presentarse?». El aristotelismo se había convertido en un prejuicio que colocaba al ser humano en el centro de un mundo perfectamente racional, fi-

nito y comprensible. El mundo que se abría a los ojos de Galileo era mucho más incierto: no solo era desconocido, sino que nada permitía garantizar que sus secretos se pudiesen acabar de desvelar por completo.

Las teorías aristotélicas aspiraban a explicarlo y comprenderlo todo, desde la estructura del cosmos hasta los cambios de las llamas del fuego. Galileo, por el contrario, estudió concienzudamente cuestiones concretas. No le preocupaba el problema del cambio en general, sino del movimiento uniformemente acelerado en particular (lo que para Aristóteles sería el cambio local). Galileo, además, renunció a explicar las causas, que era el principal propósito de la filosofía aristotélica para establecer el conocimiento. En este cambio de perspectiva se distingue al filósofo natural del científico moderno, más consciente de las limitaciones y dificultades que entraña adquirir un conocimiento real. En *El ensayador* Galileo afirma:

> Quiero inferir, tratando de la ciencia que por vía de demostraciones y del razonamiento humano pueden alcanzar los hombres, que cuanto más participe esta de la perfección, tanto menor será el número de las conclusiones que prometerá enseñar y menor aún el número de las que demostrará, y en consecuencia pocos serán los que se sientan atraídos y menor aún el número de los seguidores.

Galileo cuestionó las barreras que separaban al matemático del filósofo natural, y exigió, por ejemplo, que ambas disciplinas constaran expresamente en su cargo cuando entró a formar parte de la corte de Cosme II de Médicis. Galileo era muy consciente de que estaba usando las herramientas del matemático para conocer la naturaleza, y en esta mezcla de disciplinas, que solo podía producirse fuera de los anquilosados recintos universitarios, encontró la fórmula sobre la que residía la clave del progreso científico. Las matemáticas sirvieron a Galileo para ir más allá de las limitaciones de los sentidos.

En Galileo se encuentra además una distinción entre cualidades primarias, aquellas que pueden constituirse en objeto de conocimiento objetivo, y cualidades secundarias, subjetivas y

que solo dependen de la percepción y que no pueden constituir conocimiento:

> Considero que eliminados los oídos, la lengua y las narices, solo quedan las figuras, los números y los movimientos, pero no los olores, ni los sabores, ni los sonidos, los cuales, sin el animal viviente, no creo que sean otra cosa sino nombres.

EL MÉTODO EXPERIMENTAL

¿Cómo contribuyó Galileo a impulsar el método experimental, es decir, el rasgo más característico y distintivo de la ciencia? Mejoró las observaciones usando instrumentos, realizó experimentos y trató de expresar sus descubrimientos mediante leyes matemáticas.

LA OBSERVACIÓN

Galileo se atrevió a enfrentarse a concepciones que llegaban a ser milenarias y eran aceptadas por todos en su época. Su desafío a la autoridad se basaba principalmente en su capacidad de observación y experimentación. Tanto fenómenos comunes, como la caída de objetos pesados, como observaciones que requerían de instrumental específico, como es el caso de fenómenos astronómicos, aportaron a Galileo las pruebas para resquebrajar la fe en las doctrinas aristotélicas. Galileo fue muy consciente del poder de los hechos para derribar teorías y pudo servirse de sus observaciones para hacer tambalear los cimientos de los razonamientos más sofisticados.

Es célebre el episodio en la torre inclinada de Pisa (del que solo existe una referencia que proporciona Vincenzo Viviani, discípulo y biógrafo de Galileo, que no fue testimonio directo del acontecimiento, sino que tuvo que escucharlo por boca de su maestro), en el que un joven Galileo, profesor de Matemáticas en la facultad, mostraba a un público formado por profesores y alum-

nos que un cuerpo pesado y otro ligero caían casi simultáneamente. El rozamiento del aire impide que los cuerpos caigan exactamente a la vez —en la Luna, donde no hay atmósfera, se puede observar este fenómeno con toda claridad—, pero la diferencia era muy pequeña e inferior a la anticipada por Aristóteles.

Como Aristóteles había dejado escrito que el cuerpo pesado cae más rápidamente que el ligero, Galileo argumentó:

> Dudo grandemente que Aristóteles haya comprobado por el experimento si es verdad que dos piedras, siendo una de ellas diez veces más pesada que la otra [...], difieran en velocidad.

Los filósofos aristotélicos, mayoritarios en las universidades de la época, basaban sus creencias en razonamientos abstractos y perseguían las causas de los fenómenos, en lugar de cuestionar directamente la naturaleza. Galileo denunciaba que nadie se había preocupado por poner a prueba estas afirmaciones, sino que se habían aceptado sin más. Si Aristóteles podía equivocarse en aspectos tan sencillos de comprobar, ¿qué no podía ocurrir con sus tesis sobre la estructura del mundo?

Otro ejemplo del papel que tuvo la observación en la fundamentación de la nueva ciencia emprendida por Galileo procede del telescopio. Con este instrumento, inventado por artesanos neerlandeses, y del que Galileo supo explotar todas las posibili-

DISCUTIDOR HASTA LA TUMBA

Galileo se servía con frecuencia de la ironía para defenderse de aquellos que dudaban de sus teorías y observaciones. Giulio Libri, que era profesor de Filosofía aristotélica en la Universidad de Pisa, era uno de los que había rechazado que realmente existieran satélites en Júpiter. Tras su muerte, Galileo escribió su epitafio, que rezaba: «Ha muerto en Pisa el filósofo Libri, acérrimo impugnador de estas fruslerías mías, el cual, no habiéndolas querido ver en la Tierra, quizá las vea al irse al cielo».

dades que ofrecía para estudiar los cielos, pudo multiplicar la capacidad visual humana: fue testimonio de las manchas del Sol, de los satélites de Júpiter y de la superficie agrietada, con valles, montañas y cráteres, de la Luna. Pudo observar más estrellas en la Vía Láctea de las que nadie había visto nunca. Y es más: nada de lo que veía concordaba con el universo predicho por Aristóteles. ¿Cómo podía pensarse que el filósofo griego, con el mero razonamiento, podía ser capaz de descubrir el funcionamiento del universo entero? Su descripción de un cosmos finito, compuesto de una materia incorruptible, el éter o quintaesencia, donde los movimientos eran circulares y eternos y los astros eran perfectas esferas opacas y pulidas, no era más que un producto de la imaginación. El telescopio de Galileo desenmascaró lo que era un mundo de fantasía. De nuevo la observación fue el principal aliado de Galileo para desmoronar castillos en el aire.

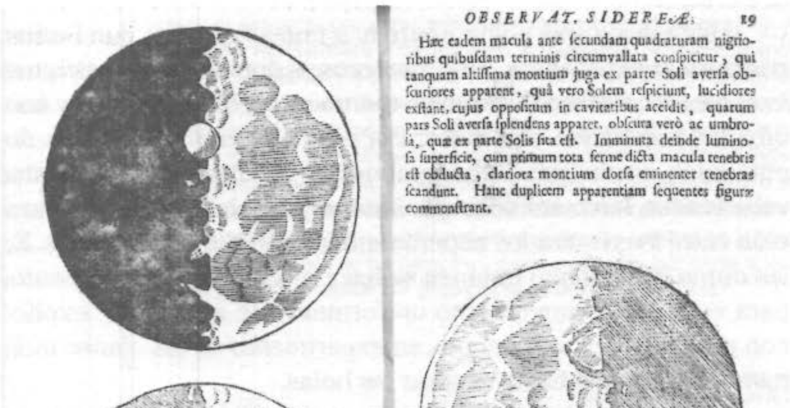
Sin embargo, no todo el mundo estaba preparado para aceptar los datos de la observación. La visión del mundo de los filósofos aristotélicos era por completo ajena a los planteamientos galileanos, y muchos de ellos fueron incapaces de aceptar los hechos que se podían ver a través del telescopio. Así, las manchas solares se convertían en defectos de las lentes o bien astros minúsculos que se encontraban entre el Sol y la Tierra, y los cráteres lunares eran ilusiones ópticas. Galileo tuvo que aceptar que hubiera colegas que, por no querer complicarse su visión del mundo, optaran por no mirar por el telescopio.

EL ARTIFICIO EXPERIMENTAL

Para Galileo no era suficiente observar fenómenos, sino que también había que provocarlos: recrear situaciones y construir un escenario propicio era fundamental para, posteriormente, poder realizar las mediciones de la forma más precisa posible. Con los experimentos, Galileo podía repetir las experiencias centenares de veces si era necesario, y tuvieron un papel fundamental para confirmar o rechazar sus intuiciones o hipótesis. Galileo fue un experimentador concienzudo y meticuloso, capaz de repetir cen-






OBSERVAT. SIDEREÆ. 19

Hæc eadem macula ante ſecundam quadraturam nigrioribus quibuſdam terminis circumvallata conſpicitur, qui tanquam altiſſima montium juga ex parte Soli averſa obſcuriores apparent, quà vero Solem reſpiciunt, lucidiores exſtant, cujus oppoſitum in cavitatibus accidit, quarum pars Soli averſa ſplendens apparet, obſcura verò ac umbroſa, quæ ex parte Solis ſita eſt. Imminuta deinde luminoſa ſuperficie, cum primum tota ferme dicta macula tenebris eſt obducta, clariora montium dorſa eminenter tenebras ſcandunt. Hanc duplicem apparentiam ſequentes figuræ commonſtrant.

B 2 Unum

FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Retrato de Galileo, obra de Ottavio Leoni (1624).

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Recreación moderna del célebre experimento de Galileo, seguramente apócrifo, según el cual el científico subió a la torre de Pisa para dejar caer dos pesos distintos, demostrando así, en contra de las tesis de Aristóteles, que ambos llegaban al suelo al mismo tiempo.

FOTO INFERIOR:
Dibujos de la Luna realizados por el propio Galileo a partir de las observaciones con el telescopio, publicados en *Sidereus nuncius*.

tenares de veces la misma experiencia para extraer la información realmente importante.

Con el diseño de un escenario artificial se podía enfocar toda la atención en las variables más relevantes que eran el objeto de estudio. El experimento era, por otro lado, una necesidad originada por la precisión matemática con la que Galileo articulaba sus hipótesis. Si la ley matemática para describir la aceleración predecía una correlación, se tenía que contrastar esta hipótesis y corregirla y adaptarla para que fuera compatible con los datos de los experimentos. Así como las observaciones le ayudaron a acabar con las concepciones filosóficas enquistadas en el pensamiento de sus coetáneos, los experimentos le permitieron fundar la física moderna. Es más, Galileo no dudó en adaptar y mejorar sus hipótesis. Mientras que en sus primeras obras estaba convencido de que los cuerpos en caída libre se mueven a velocidad constante, fue posteriormente cuando se dio cuenta de que se produce una aceleración.

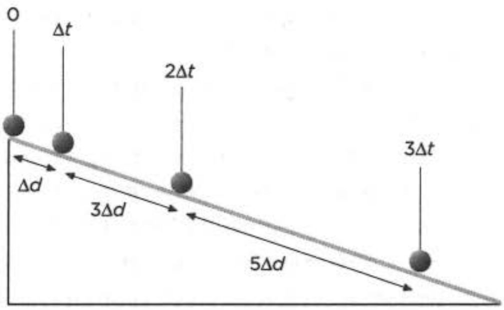
Algunos autores como Koyré han puesto en duda que Galileo realizara experimentos, pero numerosos documentos atestiguan lo contrario. Galileo describía experimentos, hacía dibujos y anotaba los resultados obtenidos. Por ejemplo, en uno de estos documentos se describe el lanzamiento de una bala a distintas velocidades, los resultados que obtuvo y, finalmente, la comparación entre los resultados experimentales con sus predicciones. En las obras que publicó también se hace referencia a experimentos para estudiar el movimiento uniformemente acelerado: explicó con gran detalle, por ejemplo, su experimento de los planos inclinados por los que hacía deslizar las bolas.

La observación y la experimentación se han convertido en piezas angulares del método científico y uno de sus rasgos definitorios y diferenciales. Este recurso a la experiencia contrastaba con la vacuidad de los razonamientos teóricos abstractos con la que trabajaban sus colegas los filósofos naturales. El proyecto galileano no tenía rival: si en una balanza se pudieran colocar las razones de Galileo por un lado, con sus observaciones y experimentos, y las de los filósofos naturales por el otro, con sus razonamientos circulares y endebles, el decantamiento por el peso de

GALILEO EXPERIMENTADOR

En sus *Discursos*, Galileo describe con gran minuciosidad uno de los experimentos que diseñó y que le permitió tratar el problema de la caída de los graves a partir del estudio con un plano inclinado. Como conclusión del experimento, Galileo afirma que el espacio recorrido es proporcional al cuadrado del tiempo, proporción que sigue enseñándose en las escuelas. En la actualidad, dicha proporción se presenta del siguiente modo: el espacio (s) y el tiempo (t) se relacionan de la siguiente manera en un movimiento uniformemente acelerado: $s = 1/2\ gt^2$, donde g es la constante gravitatoria cuyo valor a nivel del mar es de 9,81 m/s^2.

> En una regla, o, con más exactitud, en un listón de madera de unos doce codos de largo, medio codo de ancho y tres dedos de alto, realizamos un pequeño surco de una anchura apenas superior a un dedo, y, totalmente lustroso, para conseguir el mejor deslizamiento posible, dejamos rodar por él una bola de bronce muy dura, perfectamente redondeada y pulida. Colocando entonces el aparato en posición inclinada, y elevando uno de sus extremos un codo o dos por encima del horizonte, dejamos, como ya he dicho, rodar la bola por el surco anotando [...] el tiempo necesario de descenso completo; esta experiencia se realizó varias veces con el fin de determinar exactamente el tiempo, pero sin que jamás hubiésemos encontrado una diferencia superior a la décima de una pulsación. Una vez realizadas la colocación y esta primera medida, hacemos descender la bola sobre la cuarta parte del surco únicamente: el tiempo medio era siempre rigurosamente igual a la mitad del tiempo precedente. A continuación variamos el experimento, comparando el tiempo utilizado para recorrer la mitad o los dos tercios, o los tres cuartos, o cualquier otra fracción; en estos experimentos, repetidos por lo menos un centenar de veces, hemos encontrado siempre que los espacios recorridos estaban en la misma relación que los cuadrados de los tiempos, y estos cualquiera que fuese la inclinación del plano, es decir del surco por el que se hacía descender la bola.



En la figura se observa que en 1 unidad de tiempo la bola recorre 1 unidad de distancia; en 2 unidades de tiempo, 4 (=1+3) unidades de distancia (o en la mitad de tiempo recorre un cuarto de la distancia); en 3 unidades de tiempo recorre 9 (=1+3+5) unidades de distancia... Es decir, los espacios recorridos se encuentran en la misma relación que los cuadrados de los tiempos (1^2, 2^2, 3^2,...).

las evidencias sería incuestionable. El proyecto de la filosofía natural estaba destinado a fracasar, dado que en la naturaleza la verdad no podía determinarse con los mismos razonamientos que aplicaban los teólogos para escrutar la voluntad divina. Para alcanzar el conocimiento esencial de la realidad no era suficiente el intelecto y la abstracción.

PRECISIÓN NUMÉRICA

En el método de Galileo, además de la experimentación y la observación de la realidad, destaca su empeño en describir los fenómenos naturales que estuviera estudiando mediante leyes que pudieran plasmarse en lenguaje matemático. Las matemáticas eran la profesión y la pasión de Galileo, y con sus leyes lograba una predicción sumamente exacta. El experimento tenía entonces la función de comprobar si dicha predicción se cumplía. Cuanto más exacta fuera la predicción, más fácil era descubrir si la ley era correcta o bien se trataba de un error. En lugar de aspirar a explicarlo todo mediante principios irrefutables, Galileo proponía como método de conocimiento que las teorías se expusieran a ser refutadas por la experiencia. Recurrir a los experimentos no significa que Galileo derivara sus conocimientos de la experiencia y de la mera observación. Es la determinación de la ley matemática, y el grado de abstracción que supone, lo que posteriormente se pone a prueba, como hipótesis, durante el experimento. En el método científico, la hipótesis es la avanzadilla que se pone a prueba y se expone a ser tumbada por la realidad. Al superar las pruebas y los experimentos, la hipótesis se consolidaba y podía tomar la constitución de ley.

Para complementar la exactitud que le proporcionaban sus leyes matemáticas, Galileo necesitaba instrumentos capaces de medir y proporcionar los datos que necesitaba. En una época en la que no existían relojes, ni barómetros, ni termómetros, Galileo se enfrentó a la necesidad de inventar un instrumental lo más preciso posible para realizar sus cálculos. Para medir el tiempo en el experimento del plano inclinado, dejaba fluir un hilo de agua de

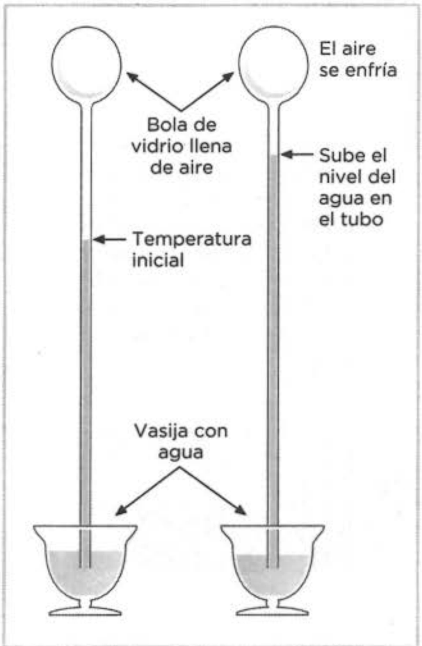
LAS MATEMÁTICAS EN EL RENACIMIENTO


Arquímedes en un cuadro pintado por Domenico Fetti en 1620.

No es casualidad que Galileo tuviera fácil acceso a las obras de matemáticos ilustres del pasado clásico, como Arquímedes (ca. 287 a.C.-ca. 212 a.C.) o Euclides (ca. 325 a.C.-ca. 265 a.C.). El Renacimiento es un momento histórico en el que resurgió la fascinación por la Antigüedad. Además, la caída de Constantinopla (1453) supuso que llegaran a Italia muchos manuscritos de autores clásicos, como Platón. Además de la pasión por el pasado, el interés por las matemáticas de la época tenía una vertiente muy práctica. Los puertos italianos se convirtieron en un nexo comercial en el intercambio entre tres continentes: Europa, Asia y África. Ya no era suficiente sumar y restar, sino que era necesario elaborar estadísticas, y se necesitaban especialistas para realizarlas. Los banqueros italianos fueron otra institución emergente de la época que requería también del servicio de los matemáticos. El capitalismo fue un aliado indiscutible para impulsar el estudio de las matemáticas y de las obras de los grandes matemáticos del pasado, como Euclides y Arquímedes.

un cubo que iba a parar a un cilindro graduado. El volumen del agua recogido en cada experimento podía compararse y relacionarse con el espacio recorrido por la bola.

Galileo también inventó el termoscopio, un instrumento para medir la temperatura consistente en llenar un tubo con agua, aunque no por completo, y colocarlo invertido en otro recipiente también con agua (véase la figura de la página siguiente). El aire atrapado en el primer tubo se dilataba o contraía en función de la temperatura, de modo que el nivel del agua del tubo variaba. Se trata de instrumental poco preciso, pero que pone de manifiesto la preocupación que animaba a Galileo y que constituiría un ele-



mento básico de la actividad científica desde ese momento. La ciencia moderna ya no se conformaría con el «más o menos»: necesitaba datos precisos, y las matemáticas y el instrumental científico serían desde entonces sus aliados.

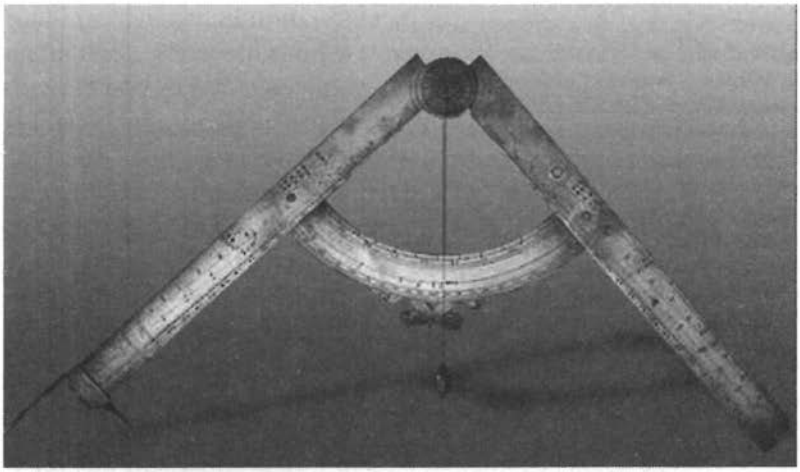
Otro de los instrumentos de medición que creó Galileo fue el compás geométrico militar. Este compás consistía en dos brazos con escalas graduadas cuya combinación ayudaba a resolver numerosas operaciones matemáticas. Lo inventó como instrumento militar, pues estaba pensado para calcular mejor la altura de los cañones con el fin de acertar en los objetivos, aunque se le encontraron infinidad de aplicaciones, por lo que tuvo un gran éxito. Galileo pudo comercializarlo, dictar clases sobre su uso e incluso escribir un manual.

El termoscopio es un instrumento que sirve para comparar diferencias de temperatura; no mide temperaturas porque carece de escala. Su funcionamiento es sencillo: cuando aumenta la temperatura, el aire que hay en el tubo se dilata, por lo que empuja el agua hacia abajo; por el contrario, cuando el aire se enfría, se contrae y el nivel del agua asciende.

En esta conjunción de matemáticas y experimentación se encuentra la fortaleza de la propuesta galileana, que constituiría el inicio de la ciencia moderna. Galileo había propuesto una forma de estudiar la realidad que en su momento fue una alternativa al aristotelismo vigente. El método de la ciencia consiste, desde entonces hasta la actualidad, en proponer hipótesis, formuladas matemáticamente, que describan un aspecto de la realidad; derivar o deducir consecuencias empíricas y comprobables experimentalmente y, a continuación, aislar los factores que intervengan para crear una situación artificial y comprobar experimentalmente dicha hipótesis. Y para saber si las predicciones matemáticas encajan con las observaciones, hacer uso de instrumentos de precisión capaces de determinar si la predicción matemática y el experimento concuerdan. El método científico se conoce como método hipotético-deductivo, y Galileo hizo tan notables contribuciones en todas las fases de este método como para que se le pueda proclamar como el primer científico moderno.

EL LITIGANTE

Galileo tuvo que recurrir a los tribunales en diversas ocasiones; una de las primeras fue a causa de su compás. Galileo quiso publicar un manual sobre su funcionamiento, pero se encontró con la sorpresa de que otro matemático se le había adelantado, y que además reclamaba la paternidad del invento. Por esta razón fue acusado de plagio, aunque finalmente el acusador fue puesto en evidencia de su engaño. La competencia con otros matemáticos y científicos del momento fue feroz y estuvo presente en todo momento, por lo que Galileo siempre fue muy cuidadoso de exponer sus invenciones y descubrimientos al gran público tan pronto como fuera posible.



Compás geométrico militar ideado por Galileo.

DE PROFESIÓN MATEMÁTICO

En su infancia y adolescencia nada hacía pensar que Galileo acabaría siendo uno de los matemáticos más eminentes de Italia; parecía más bien abocado a las artes. El padre de Galileo, Vincenzo Galilei, era músico de corte, virtuoso del laúd, así como compositor y también teórico musical. La música, que impregnaba el am-

VINCENZO GALILEI, EL MÚSICO APASIONADO

Vincenzo (1520-1591) escribió tratados sobre música, entre los que destaca el *Diálogo sobre la música antigua y la moderna*. En esta obra, escrita en forma de diálogos, como posteriormente también haría Galileo, se encuentra un párrafo muy llamativo, en el que se observa la misma tendencia a la rebelión contra lo establecido que caracterizaría a su hijo:

> Me parece que aquellos que solo se basan en argumentos de autoridad para mantener sus afirmaciones, sin buscar razones que las apoyen, actúan de forma absurda. Desearía poder cuestionar libremente y responder libremente, sin adulaciones. Así se comporta aquel que persigue la verdad.

Existen curiosos paralelismos entre la actitud vital de Vincenzo con relación a la música y la que posteriormente tendría Galileo con la ciencia. Vincenzo llevó a cabo experimentos sobre armonía en los que su hijo ejercía como ayudante. En ellos empleaba pesas y cuerdas de música con el propósito de hallar la razón matemática de las tensiones de las cuerdas que producen consonancias. En esa actitud experimental podría estar la clave de que Galileo se alejara de las matemáticas para convertirse en el primer físico moderno. Vincenzo fue también muy crítico con la esterilidad de la música eclesiástica y abogó por su renovación (de la misma manera que Galileo criticó el pensamiento aristotélico). El músico italiano fue una persona muy inquieta y estuvo en contacto con los principales teóricos musicales de la época, como Gioseffo Zarlino (1517-1590) o Girolamo Mei (1519-1594).



biente bohemio del hogar de los Galilei, no permitía obtener los mínimos recursos económicos para sobrevivir. Por esta razón Vincenzo simultaneaba el arte y la teoría musical con el comercio de lana. Esta vertiente comercial le llevó a vivir en Pisa, donde el

15 de febrero de 1564 nacía Galileo Galilei, el hijo primogénito y al que seguirían otros seis. Solo se conocen detalles de la vida de tres de ellos, Virginia, Michelangelo y Livia, porque un Galileo ya adulto tuvo que hacerse cargo económicamente de sus dotes. Del mismo modo, poco se sabe acerca de la vida de la madre, Giulia Ammannati di Pescia, y tan solo por algunas cartas que se conservan de ella. Galileo nació un año después de que finalizara el Concilio de Trento, encuentro eclesiástico que quiso ser una respuesta a la irrupción del protestantismo. Tras el concilio, las posiciones de la Iglesia se radicalizaron y se instauró el *Índice de libros prohibidos* como un instrumento de censura y control. También se instó a la Inquisición a perseguir las ideas heréticas. A lo largo de su vida, Galileo tendría que sufrir el totalitarismo que impregnó aquella época.

En sus primeros años de formación, Galileo recibió clases particulares y, además, su padre le enseñó música (Galileo terminó siendo también un virtuoso del laúd). Mostró asimismo interés y destreza con la pintura, lo que más tarde se vería reflejado en las ilustraciones que el propio Galileo creó para sus libros, que constituyen pequeñas obras maestras. También su habilidad con la escritura se reflejaría en sus propias obras, consideradas cimas de la literatura italiana. Cuando Galileo tenía diez años, Vincenzo decidió que su educación se completaría mejor con la asistencia al monasterio de Santa Maria di Vallombrosa, próximo a Florencia, ciudad a la que la familia de Galileo regresó a vivir en 1574.

Durante cinco años, Galileo convivió con los monjes del monasterio y recibió una educación sólida y humanista, y finalmente decidió hacerse novicio. Vincenzo no dudó en borrar de la cabeza de Galileo esa temprana vocación religiosa. Con la excusa de que en el monasterio su hijo no recibía los cuidados médicos necesarios para tratarle una infección en un ojo, Vincenzo se llevó consigo a Galileo a Florencia, donde se integraría de nuevo con el resto de la familia y pronto se olvidaría del camino de la fe.

Vistas las aptitudes que mostraba Galileo para el estudio, Vincenzo decidió enviarlo de nuevo a Pisa para estudiar en la universidad la carrera de Medicina, unos estudios con los que estaba convencido de que su hijo podría obtener ingresos económicos

más que suficientes que evitaran sufrir las mismas estrecheces económicas por las que él había pasado. En la familia había un antepasado que también había sido médico y había alcanzado una notable fama, por lo que parecía un buen plan.

En 1581 Galileo inició sus clases en la Facultad de Artes para doctorarse en Medicina. A pesar de no acabar los estudios, la vida universitaria tuvo una gran importancia para Galileo y para aprender ideas y concepciones que siempre tendría presentes, tanto para combatirlas como para inspirarse en ellas: la física aristotélica, la astronomía ptolemaica e incluso nociones de matemáticas. Gracias a la asimilación de estos conocimientos, posteriormente pudo señalar las deficiencias con conocimiento de causa. En la facultad, pronto se ganó el apodo del discutidor entre sus compañeros de estudio por su actitud polémica y desafiante y su fama de rebelde.

Una anécdota de sus años de estudiante —aunque las fuentes no sean del todo fiables— sirve para ilustrar que el espíritu observador de Galileo ya se manifestaba desde su juventud. Mientras se encontraba en la catedral asistiendo a un oficio religioso, observó que las lámparas de aceite que servían para iluminar la estancia y que colgaban de un cable del techo oscilaban por el viento. Galileo se dio cuenta que el ritmo de la oscilación podía servir para medir el pulso de los pacientes y sus posibles variaciones, de modo que podía dar cuenta del empeoramiento de la enfermedad. Posterior- mente, con cuerdas de diferentes tamaños unidas a pesos buscó por ensayo y error la mejor combinación que permitiera medir el pulso. Enseñó su descubrimiento a sus profesores, que a pesar de las reticencias iniciales adoptaron el invento.

Pero el acontecimiento intelectual que le marcaría de por vida no se encontraba en las universidades, sino en la corte del gran duque de Toscana Francisco I de Médici (1541-1587). Esta corte se trasladaba periódicamente de Florencia a Pisa, y con ella viajaba el matemático Ostilio Ricci (1540-1603), geómetra que había estudiado junto a Niccolò Tartaglia. Este hecho hizo posible que Galileo asistiera en 1583 a una de sus conferencias sobre Euclides, contacto que podemos suponer que fue deslumbrante. Ricci era un matemático muy influido por cuestiones prácticas. Galileo, que ya tenía diecinueve años, se enamoró de la disciplina, hasta tal

punto que no pudo evitar dedicar toda su atención a su estudio, relegando las enseñanzas de Galeno a una posición secundaria. Tomó así la determinación de ser matemático, y Ricci se ofreció a ser su maestro. Primeramente era necesario convencer a su padre, a quien Ricci logró persuadir. Galileo tenía el camino libre para dedicarse en exclusiva a su auténtica vocación: seguir la tradición de Arquímedes y de Euclides.

En 1585 Galileo abandonó definitivamente la Universidad de Pisa sin lograr finalizar los estudios. Al mismo tiempo empezó a impartir clases de matemáticas a jóvenes de familias adineradas,

NICCOLÒ FONTANA, APODADO TARTAGLIA



Tartaglia (el tartamudo; 1499-1557) fue uno de los matemáticos italianos más importantes del Renacimiento. Su fama se debe principalmente a que desarrolló la fórmula para resolver ecuaciones de tercer grado (fórmula que obtuvo al prepararse para participar en un duelo matemático, que ganó con gran facilidad gracias a dicha fórmula). A Tartaglia se deben las primeras traducciones al italiano de las obras de Euclides y Arquímedes. También destacó por aplicar las matemáticas al estudio de la trayectoria de proyectiles en el ámbito militar. Uno de los problemas que quiso resolver, en su obra *Nuova scienza* (1537), es el siguiente: ¿con qué ángulo hay que disparar un cañón para lograr el máximo alcance? Se trataba de un tipo de problemas que solo se empezaron a plantear a partir del siglo XIII, cuando se introdujo la pólvora en Europa. Según dejó escrito en su obra, este movimiento se pensaba que constaba de tres partes diferenciadas: una línea recta (en la que actuaba la fuerza impresa), un arco de circunferencia (donde la fuerza impresa daba paso a la fuerza de gravedad) y, por último, una línea vertical en caída libre. Solo Galileo fue capaz de dar con la solución correcta al descubrir que la trayectoria de los proyectiles era una parábola.

tanto en Florencia como en Siena. Llegó incluso a dar clase en el monasterio de Vallombrosa, donde había estudiado.

Dos años más tarde se trasladó a Roma para conocer al matemático Christopher Clavius (1538-1612), uno de los más eminentes de la época. Con estos contactos, Galileo buscaba hacerse un nombre y lograr una plaza en alguna universidad. En 1588 Galileo impartió su famosa conferencia sobre la localización y dimensiones del infierno de Dante. Sus buenas relaciones con la corte allanaron el camino para que cuando, en 1589, el profesor de Matemáticas de la Universidad de Pisa dejara libre la cátedra, Galileo fuera su sucesor; retornaba a la universidad como profesor donde había fracasado como estudiante. Galileo estuvo en Pisa hasta 1592 con un sueldo muy humilde. Tras la muerte de su padre, en 1591, las dificultades económicas se agravaron, dado que tuvo que hacer frente a un gran número de gastos derivados de su madre y sus hermanos. Se hacía necesario emprender nuevos retos y proyectos.

BAJO LA INFLUENCIA DE ARQUÍMEDES

Como discípulo de Ricci, Galileo recibió indirectamente la influencia de Arquímedes y de su forma de aproximarse a la matemática. Es posible que durante un tiempo conviviera en Galileo la concepción aristotélica, que rechazaba que las matemáticas pudieran describir la naturaleza por su carácter finalista y por pensar que era la cualidad, y no la cantidad, la categoría que podía proporcionar conocimiento del mundo.

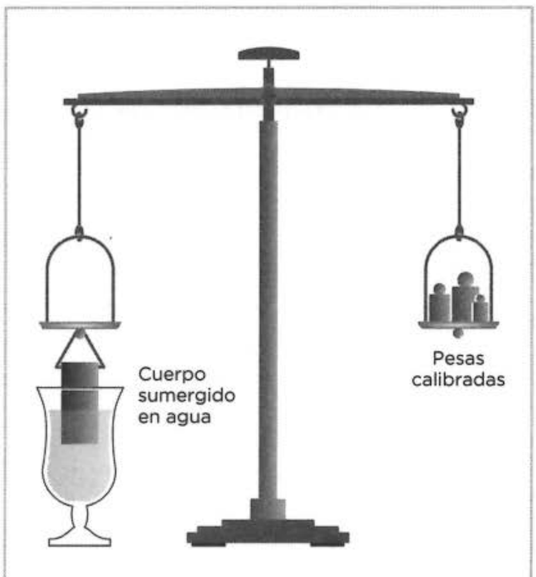
El principio de Arquímedes, según el cual un cuerpo sumergido en un líquido experimenta un empuje igual al peso del líquido desalojado, le inspiró una de sus primeras invenciones: la balancita (*bilancetta* en italiano). Se trataba de una balanza hidrostática que le permitía comparar densidades y determinar el peso específico de los cuerpos. El primer ensayo, brevísimo, de Galileo sería precisamente *La bilancetta*, publicado en 1586 y que contenía una explicación sobre el funcionamiento de su invento. En el texto se dice que está inspirado en el episodio en el que Arquíme-

des desvela el fraude de la corona de Hierón. Galileo no estaba convencido de que la explicación clásica fuera la que efectivamente tuvo lugar:

> Mientras que es bien sabido [...] que Arquímedes descubrió el robo de la corona de Hierón, el método que empleó este gran hombre para su descubrimiento sigue siendo desconocido. Algunos autores han escrito que procedió con la inmersión de la corona en el agua, y que previamente y por separado había sumergido la misma cantidad [de peso] de oro y plata, y, a partir de las diferencias en el nivel del agua más elevado o más bajo, llegó a reconocer la mezcla de oro y plata de que se hizo la corona. Pero esto parece, por así decirlo, algo crudo, muy lejos de la precisión científica.

Para Galileo, su «balancita» era la invención que Arquímedes hubiera necesitado para poder resolver su problema. Esta consta de dos brazos: de uno de ellos se cuelga el objeto en cuestión y del otro las pesas calibradas para determinar su masa (véase la figura). A continuación se sumerge el objeto en agua y se calcula de nuevo su masa. A la diferencia de masas se le aplica el principio de Arquímedes. Como la densidad del agua es de 1 g/cc, simplemente tenemos que aplicar la fórmula de la densidad: $\rho = m/V$.

La balanza hidrostática permite comparar densidades y determinar así el peso específico de los cuerpos.



Ricci, como su maestro, consideraba las matemáticas como una disciplina práctica y con múltiples aplicaciones, que iban desde el campo militar hasta la arquitectura. Se trataba, por tanto, de una tradición muy distinta a la pitagórica y a la platónica, consistente en creer que la realidad es esencialmente numérica. Para los

pitagóricos, los números determinan la estructura de los fenómenos naturales, de modo que tenían el convencimiento de que el mero estudio de las relaciones matemáticas proporcionaba un conocimiento verdadero de la propia realidad.

Galileo aprendió matemáticas ligándolas siempre a la utilidad y a la observación. La admiración que Galileo sentía por Arquímedes se aprecia, por ejemplo, cuando aseguró: «Los lectores de sus obras comprenden con absoluta claridad lo inferiores que son todos los demás ingenios comparados con los de Arquímedes».

CAPÍTULO 2

El telescopio y la revolución astronómica

Gracias al uso del telescopio se ampliaron los horizontes del universo. Galileo pudo realizar descubrimientos asombrosos, y su divulgación fue uno de los mayores acontecimientos de la época. El universo que asomaba por su telescopio no guardaba ninguna relación con la concepción heredada de la tradición. Galileo se convenció de la superioridad del heliocentrismo, y su devoción por esta doctrina revolucionaria le conduciría con los años ante la Inquisición.

En agosto de 1609, Galileo subió a la torre de San Marcos de Venecia junto a una nutrida representación de nobles venecianos para presentar un instrumento muy prometedor para la defensa de la ciudad. Servía para ver de lejos y aumentar el tamaño de los objetos, lo que permitiría avistar posibles barcos enemigos cuando aún estuvieran lo suficientemente alejados como para poder prepararse para su recibimiento.

Galileo previó que esta aplicación le podría reportar dinero y honores, como así fue, pero muy pronto encontró otro uso que satisfaría sus ambiciones intelectuales: estudiar las estrellas. Fue un momento inaugural, un nuevo comienzo de una ciencia que ya entonces tenía una historia milenaria, con unos orígenes que se remontaban a Egipto y Grecia. Desde entonces, los telescopios no han dejado de proporcionar datos fundamentales que aumentan cada vez más nuestra comprensión del universo.

Con anterioridad a la aparición del telescopio, los astrónomos habían desarrollado un instrumental específico de cálculo —no de observación—, como las esferas armilares o los astrolabios, con los que determinaban la posición de las estrellas en el firmamento. También se usaban tablas con las que predecían la posición de los planetas a lo largo del año (y de este modo podían confeccionar, por ejemplo, ajustadas cartas astrales) o bien fenómenos como los eclipses.

LOS PRIMEROS INSTRUMENTOS ASTRONÓMICOS



Compuesta como un modelo celeste, la esfera armilar se utilizaba con fines más bien didácticos: servía para mostrar el movimiento aparente de las estrellas alrededor de la Tierra, situada en el centro.

En la Antigüedad, los instrumentos desarrollados para facilitar la labor de los astrónomos no servían para visualizar mejor los astros, sino para facilitar los cálculos y las posiciones. Entre estos instrumentos destacan el astrolabio, la esfera armilar y los sextantes. Había instrumentos diseñados para dirigir la vista hacia un punto, que podía ser una estrella. El astrolabio plano permitía representar en un plano la esfera celeste, su movimiento y también el movimiento anual del Sol. También se utilizaba para calcular las posiciones de las estrellas (alturas y ángulos). En estos instrumentos había unos orificios, llamados pínulas, gracias a los cuales los instrumentos podían ser enfocados hacia una estrella para determinar su posición. La esfera armilar, también llamada astrolabio esférico, consiste en un conjunto de círculos insertados unos dentro de otros y en el que cada uno de ellos representa la eclíptica, el zodíaco, el ecuador celeste o los polos celestes. Su finalidad era principalmente educativa. Otros instrumentos, como los sextantes o cuadrantes, consistían en reglas que facilitaban el cálculo de ángulos y también permitían trasladar los problemas de geometría esférica a problemas de geometría plana, mucho más sencillos de resolver.

El gran interés que despertaba la astronomía en la Antigüedad no nacía exclusivamente del ansia de saber. La creencia en la influencia de los astros sobre los destinos humanos era compartida por amplios sectores de la población. La gente con poder podía invertir recursos para lograr los mejores astrólogos, y los

astrónomos a su vez encontraban en la astrología una fuente segura de ingresos.

La astronomía cumplía también diversas funciones prácticas, entre las que se encuentra, por ejemplo, la confección de calendarios. Los ciclos como las fases de la Luna, cuya duración es de aproximadamente 29 días, eran regularidades que permitían predecir, en culturas como la musulmana, los cambios de estación. Las estrellas se utilizaban también como referentes y guías para los navegantes, y también para determinar la posición (sobre todo la latitud, dado que la longitud, tal como se verá más adelante, era un problema de difícil solución). Para los musulmanes, conocer la posición geográfica era un imperativo, ya que las mezquitas que construían tenían que señalar obligatoriamente hacia La Meca (cuya dirección se denomina *alquibla*). De nuevo, los astrónomos eran los encargados de determinar esa dirección (con más o menos acierto, dada la carencia de medios para determinar la longitud).

Todos los astrónomos de la Edad Antigua y del Medievo compartieron, salvo raras excepciones, una misma visión del mundo, basada en la idea de que la Tierra ocupaba el centro del universo, y todos los astros, incluidas las estrellas fijas, giraban a su alrededor. Esta concepción se conoce como *geocentrismo*, y Galileo la aprendió en sus años de estudiante de Medicina y la enseñó cuando ejerció como profesor. En esta concepción coexistían dos tradiciones: una de carácter físico y mecánico, procedente de Aristóteles, que pretendía explicar el cosmos como un sistema unitario y que aspiraba a remontarse a la causa de los movimientos; la otra, más propia de astrónomos y matemáticos inspirados en la obra de Ptolomeo, tenía por objeto resolver y predecir eventos astronómicos utilizando toda clase de recursos matemáticos y sin ninguna pretensión de describir la realidad.

En el primer caso, que dio lugar a la filosofía natural, se trataba de una disciplina conceptual y cualitativa con pretensiones realistas. En la corriente astronómica se usaban las matemáticas, pero como simple instrumento. Se buscaban modelos matemáticos capaces de predecir las posiciones, sin importar si ese aparato conceptual tenía una correspondencia con la realidad.

UN COSMOS DE ESFERAS

Al mirar las estrellas en el firmamento se observa que todas ellas se mueven lentamente al unísono, en una perfecta sincronización, girando aparentemente alrededor de una estrella fija llamada estrella polar, que es la que coincide con el eje de rotación de la Tierra. Para los antiguos, estas observaciones eran un claro indicio de que esos puntos brillantes formaban parte de una esfera sólida en movimiento. Un ligero desplazamiento de la esfera produciría el movimiento de todas las estrellas a la vez, idea que se verifica tras pasar un período de tiempo observando los cielos. Durante milenios, fue común esta imagen de un universo entendido como un cosmos finito y encerrado en una esfera en la que estaban adheridos los puntos de luz llamados estrellas fijas.

Además de las estrellas fijas, los astrónomos de la Antigüedad observaron otros puntos brillantes y con una trayectoria independiente. Los griegos los llamaron *planetas*, cuyo significado en griego es «errante». Los planetas conocidos en la Antigüedad eran Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, que son los visibles a simple vista. El listado de astros lo completaban el Sol y la Luna.

Nuestros sentidos nos engañan, y nos hacen creer que todo gira a nuestro alrededor mientras que la Tierra permanece estática. Es una ilusión de la que resulta muy difícil zafarse, por lo que sorprende que en la antigua Grecia hubiera filósofos y astrónomos que afirmaran que la Tierra estaba en movimiento. Un ejemplo fue Heráclito de Ponto (siglo IV a.C.), quien defendió la rotación terrestre (antes que pensar que todo el universo se mueve a nuestro alrededor llegó a la conclusión de que era más sencillo creer que quien se mueve somos nosotros). Posteriormente, el astrónomo alejandrino Aristarco de Samos afirmó que la Tierra, además de girar sobre sí misma, era un astro que daba vueltas alrededor del Sol, al igual que el resto de los planetas. Para la época, estas ideas no podían recibir otro tratamiento que el de extravagancias: no hay nada a nuestro alrededor que nos haga suponer que nos estamos moviendo a toda velocidad por el espacio. Tales concepciones solo pudieron abrirse paso en la época moderna gracias al uso de instrumentos como el telescopio y, sobre todo, a una nueva

ARISTARCO DE SAMOS

Aristarco (ca. 310 a.C.-ca. 230 a.C.) fue un astrónomo nacido en Samos, Grecia. Estuvo ligado al Museo de Alejandría y su principal contribución fue afirmar que la Tierra está en movimiento y que gira alrededor del Sol. La obra en la que habría defendido esta tesis no ha perdurado, únicamente se conoce por la referencia de terceros. Filósofos como Cleantes (300 a.C.-232 a.C.) exigieron que fuera acusado de impiedad por defender tales ideas. También ideó la manera de predecir la distancia al Sol y afirmó que se encontraba entre unas 18 y 20 veces la distancia entre la Tierra y la Luna (en realidad es 20 veces dicha distancia).



concepción física del movimiento que explicara la ausencia de efectos de dicho movimiento sobre la superficie terrestre. Galileo no dejaría de alabar el gran atrevimiento de estos astrónomos, que supieron ir más allá de la evidencia sensible para captar el auténtico funcionamiento del mundo.

Una de las creencias más firmemente asentadas, y que incluso Copérnico (1473-1543) defendió con ahínco, versaba sobre la regularidad y circularidad de los movimientos astronómicos. Desde Platón se creía que los astros solo podían moverse circularmente y con una velocidad constante (hoy en día puntualizaríamos que se trata de velocidad angular constante). El círculo estaba considerado como la figura más perfecta y, por tanto, más propia de la divinidad. Fue un principio incuestionable, como un suelo racional indudable, frente al cual no valía ninguna observación. Cuando los datos observacionales no cuadraban con dicho principio, el esfuerzo intelectual consistía en hallar explicaciones *ad hoc* que permitieran salvar las apariencias y que las observaciones se aco-

modaran a este principio. Solo Kepler fue capaz de rechazar tal idea, para proponer en su lugar las órbitas elípticas.

EL COSMOS ARISTOTÉLICO

Para los griegos, todos estos elementos celestes tenían que formar parte de una unidad: el cosmos. ¿Por qué están todos los astros en movimiento? ¿Por qué se sostienen suspendidos en el cielo? ¿Cuál es la estructura del universo? A todas estas preguntas, Aristóteles trató de dar una respuesta consistente y racional.

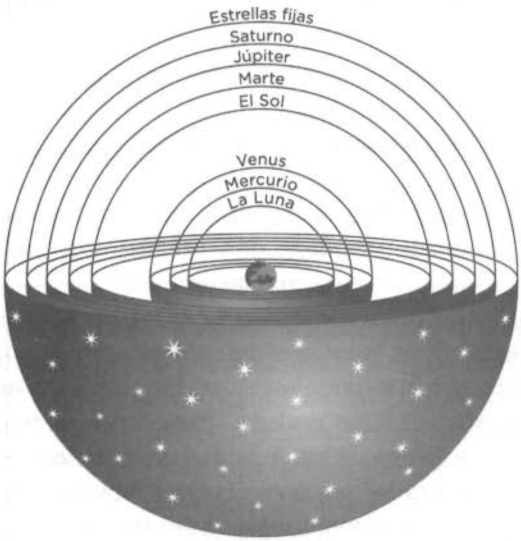
Para el filósofo estagirita, el cosmos era un conjunto de esferas en rotación colocadas una dentro de otra como si fueran muñecas rusas. Estarían compuestas de un material eterno, incorruptible y transparente llamado éter o quintaesencia. Todos los astros —planetas, Luna y Sol— se encontrarían incrustados en alguna de estas esferas, que en conjunto compondrían un sistema mecánico —como si el cosmos fuera un enorme engranaje de reloj— capaz de explicar los movimientos de todos los astros. El círculo y la esfera serían las figuras dominantes a las que se plegaría toda la realidad.

El extremo del universo finito —la esfera de las estrellas fijas— se pondría en movimiento gracias a un primer motor, identificado con la divinidad, y su rotación arrastraría a la esfera situada contiguamente. Este movimiento arrastraría el conjunto de esferas, entre las que se encontrarían las esferas planetarias y también el resto de esferas intermedias, cuya función sería exclusivamente la de transmitir el movimiento y rellenar el vacío (Aristóteles concebía que el universo era pleno). En el sistema aristotélico había un total de 52 esferas. La transmisión del movimiento procedente del primer motor tendría un sentido descendente hasta alcanzar la última esfera, donde se encontraría la Luna.

El sistema aristotélico tiene la virtud de ofrecer una explicación física y mecánica del movimiento de los astros —son arrastrados por el movimiento transmitido desde las esferas superiores–, y también es capaz de aclarar la razón por la que se sostienen en el cielo, al pender claveteados en cada esfera.

EL CENTRO DEL UNIVERSO

En el sistema aristotélico, la Tierra ocupa necesariamente el centro del universo. En el caso de que el planeta estuviera desplazado de dicho centro, todos los elementos pesados se acabarían precipitando sobre él (dado que el elemento tierra tiene esa tendencia interna a dirigirse hacia el centro), de modo que al final la Tierra volvería a ocupar el lugar que de hecho le corresponde. Para Aristóteles es inconcebible imaginar la Tierra suspendida en los cielos sin que se acabara precipitando sobre el centro. En ese cosmos solo existe, por tanto, un único centro de gravedad que proporciona una direccionalidad (arriba y abajo) absoluta. La física aristotélica, que interpreta la gravedad como una tendencia interna, apuntaló la cosmovisión geocéntrica. La física moderna dio al traste con esta vinculación entre centro del universo y centro de gravedad. Con la teoría de la gravitación universal, Newton mostró que en realidad toda materia es un foco de atracción gravitatoria, de modo que existen una pluralidad de centros o focos. En la práctica, esto suponía que la Tierra no tenía por qué ocupar necesariamente esa posición privilegiada. La física moderna dejó de apoyar, por tanto, la concepción geocéntrica.



Modelo aristotélico del universo. La concepción de unas esferas en las que se alojarían los planetas y astros fue del matemático griego Eudoxo (ca. 400 a.C.-ca. 350 a.C.).

La esfera lunar era un límite que dividía el universo en dos grandes regiones, el mundo esférico y de movimientos circulares perfectos de los cielos —mundo supralunar— y el caos propio de la Tierra, un mundo sublunar donde la corrupción, el desorden, la confusión y la muerte serían las características dominantes.

En el mundo sublunar, Aristóteles identificó cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego (el quinto elemento, el éter, forma parte del mundo supralunar). A cada uno de ellos le correspondería un lugar natural en caso de que el universo hubiera sido perfectamente ordenado. La tierra ocuparía la posición inferior, por ser el elemento más impuro y degradado, y cuya pesadez le impulsaría hacia el centro del cosmos para yacer en quietud (mientras que en la actualidad, la gravedad se considera como una relación entre objetos materiales, para Aristóteles era un impulso interno a dirigirse hacia el centro). El agua, al ser menos pesada, fluiría sobre la tierra; el aire ocuparía la capa superior y por último el fuego se elevaría por encima de todos los demás. Esta jerarquización reflejaría el grado de incorruptibilidad y pureza de cada elemento.

LA ASTRONOMÍA PTOLEMAICA

El modelo aristotélico proporcionaba una visión racional, a la vez que sumamente pesimista, de la mecánica del mundo. Sin embargo, cuando los astrónomos analizaban al detalle las posiciones exactas de los astros, tuvieron que afrontar el hecho de que no encajaban las piezas. Si se querían mantener principios como la centralidad de la Tierra o el movimiento circular uniforme, era necesario sacrificar la cosmovisión realista. Para predecir fenómenos celestes, como la variación de luminosidad o velocidad de los planetas o sus retrocesos, era necesario una mayor libertad operacional.

Más que una visión de conjunto, los astrónomos buscaron soluciones para cada problema particular usando instrumentos matemáticos, considerados como artificios útiles. Es decir, buscaban la máxima precisión de los eventos, en lugar de tratar de describir el mundo real. Esta desvinculación de la realidad pro-

RECHAZO DEL HELIOCENTRISMO



Ptolomeo (ca. 100-ca. 170) tuvo en cuenta la hipótesis heliocéntrica, pero la descartó: «Aunque no haya nada quizás en los fenómenos celestes que contravenga esta hipótesis, sin embargo, a partir de lo que ocurre aquí en la Tierra y en el aire, podemos ver que tal idea es francamente ridícula». Tal como el propio astrónomo reconoce, a partir de la información astronómica recogida es imposible decantarse por un modelo u otro. Ambas concepciones son consistentes con las observaciones. Sin embargo, la diferencia reside en la propia Tierra. Si esta se moviera, los efectos de dicho movimiento serían fácilmente observables. Será necesaria una nueva física —a la que hay que otorgar a Galileo la paternidad— para que se comprenda que no hay incompatibilidad.

porcionaba además otra ventaja, ya que los astrónomos tenían libertad para proponer soluciones y los modelos matemáticos que quisieran. Con tal de que funcionaran, era indiferente si resultaban descabellados.

El astrónomo egipcio Claudio Ptolomeo ha sido el más influyente de la Antigüedad. Fue el autor de una obra inmensa titulada *Sintaxis matemática*, que en árabe se tradujo como *Almagesto* (el más grande), y así es como se popularizó en Europa, gracias a las traducciones del árabe al latín que se fueron realizando a partir del siglo XIII. En este libro, Ptolomeo llevó a cabo una inmensa tarea de recopilación y compilación de datos y concepciones de los astrónomos precedentes. Hay aspectos originales, pero su valor reside principalmente en su capacidad para sintetizar el conocimiento astronómico de la Antigüedad, por ejemplo de astrónomos como Hiparco (ca. 190 a.C.- ca. 120 a.C.), cuya obra se ha perdido. Según asegura el autor en la introducción de la obra:

> Solo haremos referencia a lo que ha sido rigurosamente probado por los antiguos, y perfeccionaremos tanto como podamos aquellos aspectos que no hayan sido completamente probados o que no se hayan probado de la mejor manera posible.

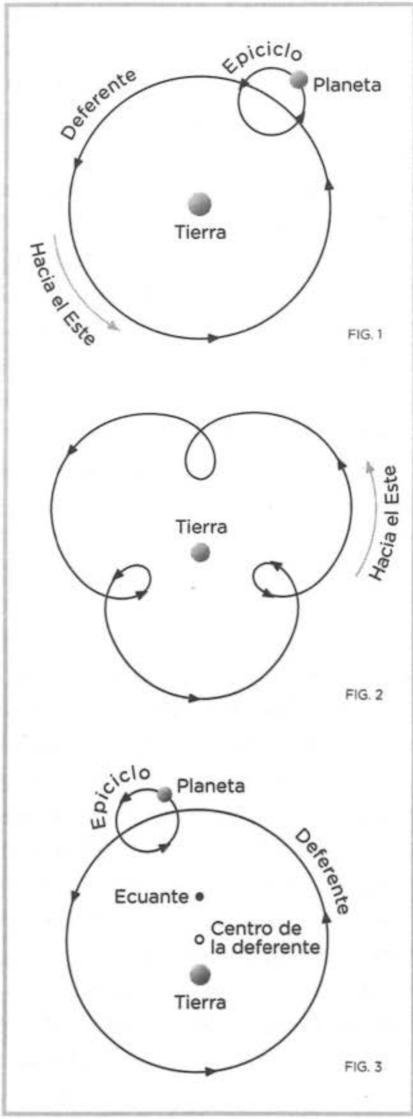
Como afirma el filósofo de la ciencia Norwood Russell Hanson (1924-1967), Ptolomeo aspiraba a salvar las apariencias y solucionar problemas, pero a costa de sacrificar la visión de conjunto. La astronomía ptolemaica ofrecía «una colección de herramientas de cómputo» carente de unidad. Por esa razón, Ptolomeo puede ser considerado como «un ingeniero-contratista celeste que adaptaba sus herramientas con habilidad e ingenio a cada nuevo problema que iba surgiendo». Entre estos artificios matemáticos y geométricos se encuentran los epiciclos y deferentes, las excéntricas y los ecuantes.

EPICICLO-DEFERENTE

Los epiciclos y las deferentes son una de las mejores muestras de la creatividad griega aplicada a resolver problemas aparentemente irresolubles. Ptolomeo y el resto de los astrónomos de la Antigüedad estaban absolutamente convencidos de que el movimiento planetario era circular. Sin embargo, la observación de los planetas en determinadas épocas del año arrojaba un resultado asombroso. Los planetas, que parecían avanzar a lo largo de las distintas noches de observación, en contraste con las estrellas fijas, llegaba un momento en que se detenían e incluso retrocedían, para finalmente retomar el camino hacia delante. ¿Cómo conciliar las apariencias con los principios? Los artificios matemáticos y geométricos lograron solucionar este tipo de problemas.

En el siglo III a.C., Hiparco tuvo la genial idea de combinar distintos movimientos en círculo para explicar este extraño bucle. Según este astrónomo, los planetas orbitarían alrededor de la Tierra combinando dos movimientos: por un lado, un movimiento circular, llamado *epiciclo*, alrededor de un punto que simultáneamente estaría girando alrededor de la Tierra, y compondría una

línea imaginaria llamada *deferente* (figura 1). En la combinación se aprecia que la órbita planetaria traza varios bucles antes de completar una vuelta alrededor de la Tierra (figura 2). Esta ingeniosa solución fue adoptada por Ptolomeo, quien además se sirvió de epiciclos mucho más pequeños, llamados *epiciclos menores*, con los que perseguía afinar al máximo los datos para algunas órbitas, como la solar.



Para explicar los movimientos de retrogradación de los planetas, el modelo ptolemaico defendía que estos orbitan alrededor de la Tierra combinando dos movimientos circulares: el deferente y el epiciclo (figura 1). En consecuencia, el planeta realizaría varios bucles antes de completar una órbita en torno a la Tierra (figura 2). Las anomalías que se observaban en las órbitas eran producto de su excentricidad, ya que la Tierra se encontraba desplazada del centro (figura 3). Por otro lado, la velocidad angular constante que se le suponía a los planetas tan solo podía apreciarse desde unos puntos imaginarios llamados ecuantes, pero no desde la Tierra.

EXCÉNTRICAS Y ECUANTES

Otro de los recursos matemáticos usados por Ptolomeo fueron las excéntricas. Según esta concepción, los planetas no tendrían necesariamente que girar en círculos cuyos centros coincidieran con el centro de la Tierra (figura 3). Los astrónomos, para que los datos recopilados pudieran conciliarse con su cosmovisión, adoptaron la idea de creer que la Tierra se encontraría ligeramente desplazada respecto del centro de las órbitas planetarias. Cada planeta tendría una trayectoria excéntrica sin que hubiera necesidad de que tales puntos coincidieran entre sí. Era un nuevo desvío de la cosmovi-

sión aristotélica, según la cual las esferas planetarias eran homocéntricas (todas con el mismo centro: la Tierra).

Ptolomeo también usó otro artificio destinado a salvar las apariencias: los ecuantes. Tal como se ha explicado, los planetas tenían que recorrer las trayectorias con velocidades angulares constantes. Como las observaciones violaban de nuevo dicho principio, Ptolomeo supuso que existían unos puntos, denominados *ecuantes*, desde los cuales se podía observar la uniformidad en el movimiento planetario. Este punto tampoco coincidiría con el centro de la Tierra, lo que explicaría que no fuéramos capaces de observar dicho movimiento regular. Desde el punto ecuante, el movimiento planetario tendría una velocidad uniforme, pero no circular. Desde la Tierra, sería circular, pero no regular. Los ecuantes son una invención destinada a garantizar la posición central de la Tierra en el universo.

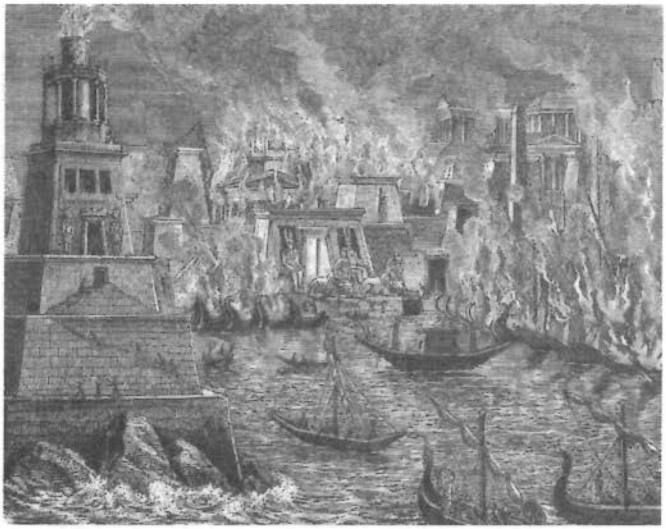
El sistema de Ptolomeo es complejo y muy exacto. Su gran poder predictivo y su capacidad para salvar las apariencias mediante los artificios necesarios, a pesar de que la imagen del mundo que se derivaba era inconsistente, hizo que fuera muy apreciado hasta el Renacimiento. Su obra fue la base que utilizaron los astrónomos árabes, que interpretaban los datos que obtenían mediante los recursos geométricos ptolemaicos. La labor de la ciencia árabe de conservar estas obras y promover las investigaciones astronómicas fue aprovechada posteriormente por Occidente, gracias a que, a partir del siglo XIII y XIV, se hicieron traducciones de dichas obras a partir del árabe.

LA REVOLUCIÓN COPERNICANA

Según una leyenda, Alfonso X el Sabio, tras estudiar las tablas astronómicas elaboradas por sus astrónomos a partir de las concepciones ptolemaicas, afirmó que en caso de que Dios le hubiera pedido su opinión antes de crear el mundo, le hubiera aconsejado que hiciera las cosas un poco más simples. Existía, además, la inconsistencia entre la explicación físico-mecánica de Aristóteles,

PTOLOMEO Y EL MUSEO DE ALEJANDRÍA

Alejandría fue una ciudad fundada en Egipto por Alejandro Magno en 331 a.C., tras liberar a los egipcios del sometimiento persa. El Museo fue una institución destinada a la enseñanza y la investigación que fue construido en 280 a.C. por Ptolomeo Soter I, uno de los generales macedonios que acompañaron al gran Alejandro en su periplo conquistador y que tras la muerte de este heredó Egipto. La institución pronto se convirtió en uno de los principales centros investigadores de la Antigüedad, y sustituyó a Atenas como ciudad de referencia. Se componía de una diversidad de edificios con jardines. Uno de estos recintos era la Biblioteca de Alejandría, famosa por acumular casi todo el conocimiento de la época. Formaron parte del museo matemáticos como Arquímedes, Euclides o astrónomos como Aristarco de Samos. También Herón de Alejandría, experto en engranajes y autor de la obra *Autómata*. O la matemática Hipatia. Uno de los científicos destacados del Museo fue el egipcio Claudio Ptolomeo, de cuya vida paradójicamente no ha trascendido nada, únicamente aquello que quedó reflejado en sus escritos. Además de astrónomo, fue cartógrafo y llegó a elaborar los mapas más precisos de la época. Entre sus proezas destaca haber catalogado 1022 estrellas.



***Incendio del Museo de Alejandría*, grabado de 1876, en el que se puede apreciar el Faro de Alejandría, a la izquierda, y la Biblioteca, a la derecha.**

capaz de proporcionar una cosmovisión consistente y racional, y la tradición astronómica, difícil y necesitada de una compleja maquinaria matemática destinada a solucionar cualquier incompatibilidad con las observaciones.

Estos problemas se hicieron eco en Nicolás Copérnico, canónigo polaco y astrónomo, que al estudiar la obra de Ptolomeo llegó a la siguiente conclusión:

> [sus concepciones] no han podido descubrir o deducir lo más importante, esto es, la forma del mundo y la simetría de sus partes. Más bien son comparables a alguien que tomase de diversos lugares manos, pies, cabeza y otros miembros auténticamente óptimos, pero no adecuados para representar un solo cuerpo al no corresponderse entre sí, de modo que con ellos compusiera más un monstruo que un hombre.

Para Copérnico, la causa del estropicio perpetrado por Ptolomeo residía en haber escogido una concepción errónea del mundo. Con otro enfoque, en el que el Sol estuviera en el centro del universo y la Tierra girara a su alrededor con el resto de los planetas, se garantizaría mejor el principio platónico del movimiento planetario en círculos perfectos y a velocidad angular constante. La revolución copernicana nació, por tanto, al querer restituir este dogma tan preciado de la Antigüedad. Así lo explicaba Copérnico en un pequeño tratado titulado *Commentariolus*:

> Me preguntaba a menudo si sería posible hallar un sistema de círculos más racional, mediante el cual se pudiese dar cuenta de toda irregularidad aparente sin tener para ello que postular movimiento alguno distinto del uniforme alrededor de los centros correspondientes, tal y como el principio del movimiento perfecto exige.

El proyecto de Copérnico no se basa, por tanto, en nuevas observaciones, sino en una aspiración a ofrecer un sistema coherente y más simple. Además, la posición central del Sol era, para Copérnico, la más natural: «En medio de todo está el asiente del Sol. Pues ¿quién pondría esta lámpara en otro lugar mejor que en este más bello de los templos, desde el cual puede iluminar todo

NICOLÁS COPÉRNICO



Copérnico (1473-1543) nació en Toruń, Polonia. Debido a la temprana muerte de su padre, su tío, el obispo Lucas Watzenrode, lo tomó bajo su protección y ejerció una gran influencia en su vida. Estudió astronomía y astrología en la Universidad de Cracovia y completó sus estudios en Bolonia, donde ejerció como asistente de su profesor en la producción de horóscopos de numerosos príncipes, gracias a lo cual llegó a alcanzar un gran dominio en esta práctica. No obstante, también se familiarizó con la obra de Pico della Mirandola (1463-1494), filósofo muy crítico con la astrología. Su maestro también lo introdujo en los aspectos más difíciles de la obra de Ptolomeo. La preparación teórica que recibió Copérnico en el campo de la astronomía contrasta con la escasez de observaciones que realizó por sí mismo, que fueron solo anecdóticas (cita explícitamente en su obra *De revolutionibus* su observación de la estrella Aldebarán, o Alfa Tauri, la más brillante de la constelación de Tauro). En 1501 Copérnico se instaló en Padua para estudiar medicina. Al finalizar los estudios, regresó a Polonia, donde su tío le ofreció un cargo administrativo en la diócesis de Breslavia, ciudad donde ejerció la medicina gran parte de su vida. Pudo alternar esta actividad con la astronomía, disciplina en la que había adquirido una gran reputación. Se suele atribuir su prudencia a manifestar sus opiniones sobre astronomía al temor a sufrir represalias de los estamentos religiosos, aunque hay historiadores que consideran que en esa época no existía un clima de intolerancia como el que se viviría décadas más tarde, con el proceso a Bruno y a Galileo. En todo caso, *De revolutionibus orbium coelestium*, en la que defendía el heliocentrismo, se publicó al final de su vida, en 1542, a pesar de tratarse de un proyecto elaborado décadas atrás. Años antes había redactado un texto breve llamado *Commentariolus*, en el que quiso dar a conocer sus ideas a los más allegados. Se da la circunstancia de que en 2008 se encontraron unos restos humanos en la catedral de Frombork que fueron identificados como los de Copérnico. Se le volvió a dar sepultura en el mismo recinto dos años más tarde.

al mismo tiempo?». Con el Sol en el centro, la Tierra tenía que moverse necesariamente. Por un lado, el movimiento de rotación diurno. En segundo lugar, un movimiento de traslación anual alrededor del Sol. Y en tercer lugar, un movimiento de cabeceo del eje, como si se tratara de una peonza, que se conoce como *precesión de los equinoccios*.

«Todo cambio de posición aparente proviene del movimiento de la cosa vista o del movimiento del espectador, o de movimientos desiguales de ambos.»

— NICOLÁS COPÉRNICO.

Copérnico mantuvo en su sitio la esfera de las estrellas fijas que constituirían el límite del universo. Sin embargo, consideró un sinsentido pensar que dicho límite se encontrara en movimiento rotacional: «¿Por qué seguimos empeñándonos en hacer mover algo cuyos límites desconocemos, en lugar de que sea la Tierra la que lo haga, perteneciendo al cielo la apariencia de movimiento?». También tuvo que seguir apoyándose en epiciclos y deferentes, pero en un número menor.

Como puede apreciarse, el sistema copernicano mantuvo las mismas piezas ptolemaicas, pero encajándolas de forma distinta, lo que forzaba a ver el mundo desde una nueva perspectiva.

Esta relatividad del movimiento se convertiría en un elemento central de la nueva física. Para Copérnico, explicaba numerosos fenómenos sin tener que recurrir a tantos recursos artificiales.

CONSECUENCIAS DEL COPERNICANISMO

La obra de Copérnico fue ignorada durante medio siglo. Solo entre astrónomos obtuvo cierta repercusión, pero entendida como artificio matemático. Seguían, de hecho, las indicaciones marcadas por Osiander (1498-1552), el editor de la obra y autor del prólogo, que animó a que se interpretara según esta respetable tradición astronómica. En la práctica, era una forma de convertir en pólvora

mojada lo que constituía la semilla de una nueva forma de entender el mundo y el lugar del ser humano en él.

A pesar de los inicios titubeantes, poner la Tierra en movimiento desencadenó toda una revolución. La distinción aristotélica entre dos mundos, sublunar y supralunar, dejaba de tener sentido, dado el nuevo escenario. Y la Tierra entendida como único centro de gravedad del universo dejaba paso a una concepción múltiple de centros gravitatorios, lo que obligaba a plantearse preguntas sobre la naturaleza de esa fuerza misteriosa. Todo esto empezó a cuestionarse cuando la hipótesis empezó a tomarse en serio como alternativa para describir la realidad.

Entre los escollos a superar se encontraba la ausencia de evidencias sobre la superficie terrestre de que dicha superficie se estuviera moviendo. Es más, todo apuntaba a que la Tierra se encontraba inmóvil. Por ejemplo, una Tierra en rotación supone que su velocidad de giro es elevadísima. Nubes y pájaros se deberían ver por esa razón siempre desplazándose hacia el oeste (dado que la Tierra gira en sentido contrario). Por otro lado, al lanzar un objeto verticalmente desde un edificio de altura considerable, en una Tierra en movimiento jamás caería a los pies. Copérnico evidenció que la nueva cosmovisión exigía una nueva física.

BRUNO Y LA INFINIDAD DEL ESPACIO

Los astrónomos se dieron cuenta paulatinamente de la superioridad de cálculo del copernicanismo, a pesar de que lo rechazaran como concepción cosmológica. Cuando comenzó a despertar curiosidad, sus ideas se empezaron a prohibir —fueron los luteranos los que primero tacharon su obra de herética— y su enseñanza fue apartada de la universidad. A pesar de este clima global de rechazo, aparecieron astrónomos que se declararon copernicanos. Es el caso del inglés Thomas Digges (1546-1595), quien, a partir de la observación de una supernova en 1572 —que tal como se verá más adelante, es la misma que ocupó a otro de los grandes astrónomos de la época, el danés Tycho Brahe—, escribió que este acontecimiento invalidaba el sistema ptolemaico.

GIORDANO BRUNO



Aunque no fue ni científico ni astrónomo, Bruno (1548-1600) fue un visionario que defendió con pasión el giro copernicano. Fue mucho más lejos que sus coetáneos al asegurar que no existía una esfera de estrellas fijas donde se circunscribiera el universo. Creía que las estrellas eran como soles que se desparramaban por un espacio infinito, visión que suponía en realidad superar también el heliocentrismo, porque dejaba de tener sentido preocuparse por el centro del universo. Además, tenía la convicción de que algunos de estos soles podrían estar poblados por seres inteligentes. Sacerdote y teólogo, se interesó por todas las ciencias de su tiempo. Como Galileo, también creía que la Biblia tenía que servir como guía moral, y no había que entenderla como un manual de astronomía. Escribió numerosas obras, como *La cena de las cenizas* o *Sobre el infinito universo y los mundos*. Hijo de un soldado, su auténtico nombre era Filippo Bruno. Estudió humanidades y latín, y en 1565 entró en un convento dominicano donde adoptó el nombre de Giordano y fue ordenado sacerdote.

Huida y condena

Por sus lecturas de autores prohibidos y libros heréticos recayó sobre él la sospecha de herejía, y en 1576 se inició un proceso en su contra. Escapó a Roma, donde fue acusado —falsamente— de asesinato, de modo que se vio obligado a huir de nuevo. Esta vez se dirigió a Ginebra, colgó los hábitos y se convirtió al calvinismo. Sin embargo, de nuevo un texto crítico con esta religión provocó que se enfrentara a las autoridades. Acabó por asentarse en París, y luego en Londres, donde siempre fue acogido en la corte. Fue el momento más productivo de su carrera y cuando escribió sus obras más importantes. Posteriormente viajó por Alemania impartiendo clases y lecciones en universidades. En 1591 fue invitado de nuevo a Venecia, donde tuvo conocimiento de que en la Universidad de Padua había vacante una plaza de profesor de Matemáticas. Aunque aspiró al puesto, finalmente recayó sobre Galileo. De nuevo en Venecia, su protector, después de algunas desavenencias, lo entregó a la Inquisición y lo acusó de herejía. El tribunal romano de la Inquisición pidió la extradición, por lo que fue conducido a Roma, donde estuvo en prisión durante ocho años, acusado, entre otras ideas, de negar la divinidad de Jesucristo. Finalmente fue condenado a morir en la hoguera.

Uno de los más fervorosos defensores de las ideas de Copérnico fue Giordano Bruno. Las aportaciones de este filósofo a la astronomía, que asumía la verdad del copernicanismo, se centraban en sus razonamientos dirigidos a resquebrajar el cosmos aristotélico y sustituirlo por un universo infinito. Bruno argumentó que el movimiento unísono y uniforme de las estrellas es un efecto óptico producido por su lejanía, que provoca que aparentemente las veamos a la misma distancia. Para Bruno, colocar una esfera como límite del mundo fue una decisión arbitraria y sin apoyo empírico. Si no hay esferas, en ese caso las estrellas hay que suponer que se encuentran esparcidas por el espacio, a diferentes distancias. Es más, dicho espacio sería ilimitado y, por tanto, infinito. Mientras que Aristóteles considera que no existe el vacío, Bruno separa materia y espacio. El espacio tridimensional empieza a tomar la consideración de realidad. Se empieza a concebir un universo sin lugares privilegiados, como el centro de la Tierra, y sin direcciones absolutas —arriba y abajo—, sino relativas.

Bruno fue aun más allá en sus especulaciones y llegó a suponer, tal como ya habían hecho los atomistas en la Antigüedad, que existen infinidad de mundos, con soles, planetas y seres vivos como en la Tierra. La idea de infinitud había quebrado esa última esfera que, como un fósil, perduraba desde la Antigüedad.

BRAHE, EL ASTRÓNOMO DE LA EXACTITUD

Antes de que se empezara a usar el telescopio, el astrónomo que logró los datos más precisos de la historia fue Tycho Brahe. Hasta ese momento, nadie había logrado recabar tantas referencias y tan precisas. Brahe fue un astrónomo muy escrupuloso, y siempre dispuesto a reducir al máximo sus errores. Usaba, por ejemplo, instrumentos gigantescos, como astrolabios y esferas armilares, para determinar la posición de los astros, ya que el tamaño incrementaba la precisión. Se preocupó de aumentar la estabilidad del instrumental usado, y también de realizar observaciones constantes.

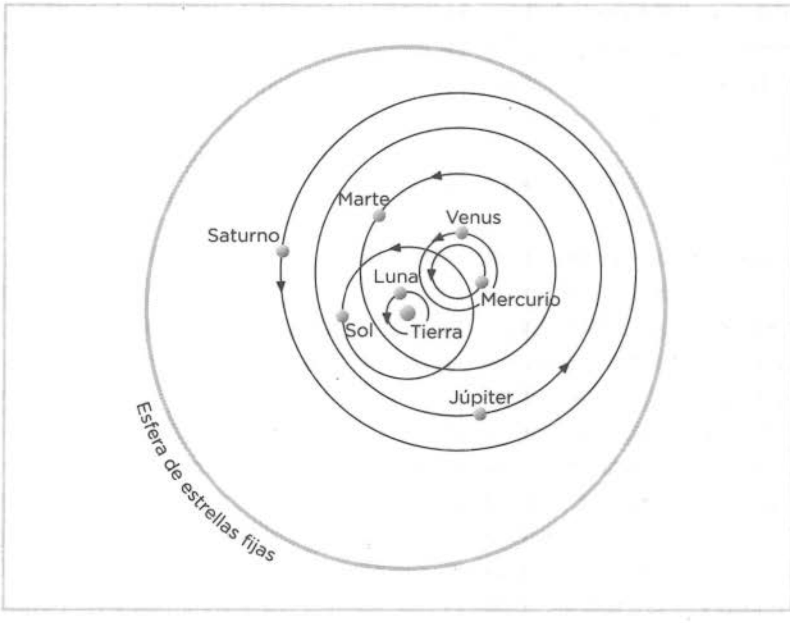
Esta ingente cantidad de información le convenció de que el geocentrismo era falso, pero no le condujo al copernicanismo. Para

reordenar los datos en un sistema que tuviera sentido, ideó su propia cosmovisión, que se encontraba a medio camino entre el heliocentrismo y el geocentrismo. Siguió manteniendo el universo contenido en una esfera de estrellas fijas, con la Tierra ocupando su centro y el Sol y la Luna girando a su alrededor. Pero añadió que el resto de planetas no giraría alrededor de la Tierra, sino del Sol.

Hubo dos observaciones que, gracias a la enorme precisión con la que trabajaba, tuvieron enormes implicaciones para dejar sin base el proyecto geocéntrico. En 1572, Brahe fue testigo de la supernova a la que se ha hecho referencia previamente. En una región de la Constelación de Casiopea empezó a fulgir con gran intensidad una estrella. Los aristotélicos interpretaron la repentina aparición como si fuera un fenómeno meteorológico, pero Brahe, con los datos en la mano, pudo demostrar que la estrella se encontraba más allá de las órbitas de los planetas. Un fenómeno próximo a la Tierra mostraría una paralaje que no se produjo en este caso.

De forma semejante ocurrió en 1577, cuando la aparición de un cometa vino de nuevo a turbar la paz de los cielos, y Brahe

Sistema del mundo propuesto por Tycho Brahe, que resulta una mezcla de los modelos geocéntrico y heliocéntrico. El astrónomo danés nunca llegó a aceptar totalmente el modelo copernicano, y desde el aspecto observacional su alternativa ofrece resultados similares.



pudo nuevamente oponerse a los aristotélicos que hacían referencia a fenómenos sublunares. Las mediciones de Brahe le condujeron a otra conclusión: su órbita se encontraba más allá de Venus y además tenía que atravesar las supuestas esferas cristalinas que contenían a los planetas. La precisión en las mediciones se aliaba para contribuir al derrumbe de un edificio que se empezaba a sostener exclusivamente por la fe, ya que los hechos lo contradecían.

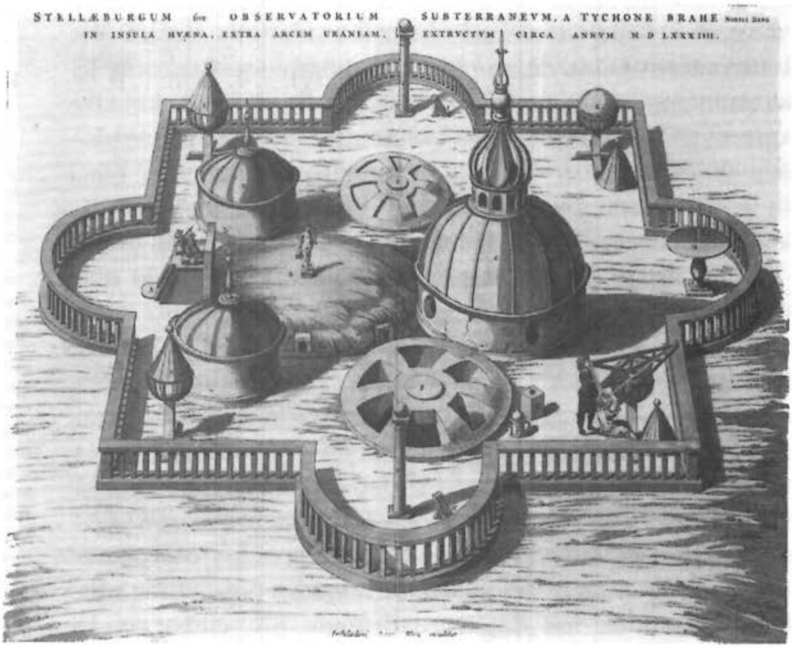
KEPLER: «DIOS SIEMPRE GEOMETRIZA»

Nacido en tierras protestantes, Johannes Kepler (1571-1630) aprendió el modelo copernicano en Tubinga como una concepción meramente instrumental y artificial. Sin embargo, desde el primer momento intuyó que tenía que ser verdadero. Kepler era un platónico convencido de que tras la confusión y el caos de la realidad tenía que existir un orden. Esto significaba que si el sistema copernicano era cierto, tenía que ocultar multitud de regularidades y simetrías. Por ejemplo, el número de planetas, seis, incluida la Tierra, tenía que obedecer a una razón que sería posible desvelar. Kepler creyó encontrarla: hay seis planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno), de modo que existen cinco espacios interplanetarios. Y precisamente solo puede haber cinco poliedros regulares: tetraedro, cubo, icosaedro, octaedro y dodecaedro. Según esto, la órbita de cada planeta y la esfera de la que formaría parte se encontraría circunscrita en un sólido regular e inscrita en otro. Y todo el conjunto estaría encerrado en una esfera. Esta regularidad era la prueba racional de que la Tierra era un planeta más. Kepler no pensaba que tales formas existieran en la realidad, sino que los espacios interplanetarios se atendrían a las relaciones determinadas por dichos sólidos. Aparentemente, los datos cuadraban. Sin embargo, la correspondencia no era perfecta, y esta desviación le llevó a revisar todos los datos recogidos hasta entonces.

La necesidad de contar con datos fiables y con el mínimo margen de error posible le condujo a contactar con Brahe, quien lo

BRAHE Y URANIBORG

Tycho Brahe nació en Dinamarca en 1546 y estudió derecho y filosofía en Copenhague. Se cuenta que su pasión por la astronomía nació cuando a los catorce años observó un eclipse solar. Brahe empezó a hacer observaciones y en 1576 le llegó una oferta imposible de rechazar: el rey de Dinamarca le propuso fundar y dirigir un observatorio astronómico en la isla de Hven, donde se construyeron dos castillos para alojar las instalaciones, aparatos y personal necesario, Uraniborg (literalmente, *castillo del cielo*) y Stjarneborg *(castillo de las estrellas)*. Brahe tuvo a su disposición numerosos medios económicos, e incluso una imprenta para dar a conocer los resultados de sus descubrimientos. Tras la muerte del rey, tuvo que abandonar la isla, para encontrar refugio junto al emperador Rodolfo II de Bohemia. Se instaló en otro castillo cerca de Praga, donde tuvo como ayudante a Kepler. Murió como matemático de la corte en 1601.



Observatorio astronómico de Uraniborg, situado en la isla danesa de Hven.

aceptó como ayudante. Uno de los primeros encargos que recibió fue estudiar la trayectoria de Marte a partir de la concepción tychiana. Las disputas sobre la interpretación de los datos emergieron rápidamente, pero Brahe fallecería al cabo de poco tiempo. Kepler pasó a ocupar su puesto como matemático imperial y, además, tuvo el camino abierto para usar todos los datos que le interesaban. Esta investigación fue lo que le acabó conduciendo a la formulación de las conocidas como *leyes de Kepler*.

«Todo está en armonía con todo.»

— Johannes Kepler.

En su estudio de Marte, Kepler observó, por un lado, que los planetas tienen tiempos distintos de revolución y sus velocidades decrecen con la distancia. Y también se dio cuenta de que las órbitas no podían ser círculos perfectos: no había manera de encajar los datos con este tipo de órbitas. Su idea de un universo matemático se resquebrajaba por la fuerza de los hechos. También llegó a la conclusión de que el origen del movimiento planetario no podía brotar de la periferia del cosmos, como pensaba Aristóteles, sino que nacía del mismo Sol. De este modo, concluyó que la disminución de velocidad de los planetas estaba relacionada con la distancia al Sol.

LOS DESCUBRIMIENTOS DE GALILEO

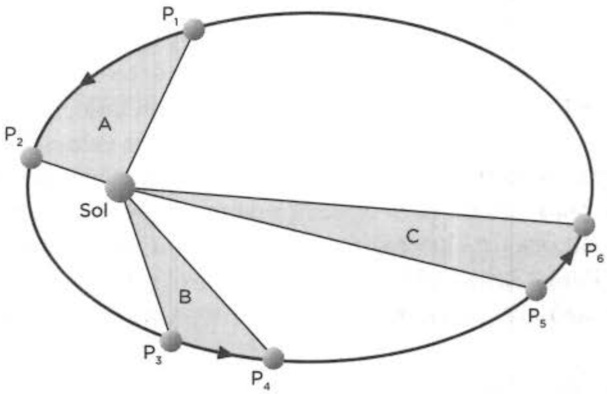
Galileo no es un astrónomo comparable a otros de la época. Su finalidad no fue nunca recopilar los mejores datos para usarlos en la confección de mejores tablas astronómicas, ni tampoco sus observaciones le condujeron a reflexionar sobre la mecánica celeste, tal como hizo Kepler. El lugar privilegiado que ocupa Galileo en la historia de la astronomía se debe a sus descubrimientos con el telescopio y a los efectos sobre la cosmovisión que tuvieron dichas observaciones.

LAS LEYES DE KEPLER DEL MOVIMIENTO PLANETARIO

Para determinar el movimiento planetario, Kepler enunció tres leyes. Las dos primeras las presentó en 1609, mientras que la última la publicó en 1618:

— Según la primera ley, los planetas se mueven alrededor del Sol en órbitas elípticas, con el Sol en uno de sus focos.

— Según la segunda ley, la línea que une un planeta cualquiera con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales (véase la figura).



A = B = C $\qquad$ P_x = posición del planeta

— La tercera ley afirma que el cuadrado del período orbital de cualquier planeta es directamente proporcional al cubo de su distancia media al Sol. Expresado de forma algebraica, si se tiene que la distancia media es r y el período orbital es T, entonces:

$$\frac{T^2}{r^3} = \text{constante.}$$

El telescopio ejerció, en primer lugar, una gran influencia en la fortaleza de sus propias convicciones. Aunque se desconoce el momento en que se produjo su aceptación del copernicanismo, se mostraba muy cauto. En una carta a Kepler, datada en 1597, afirma

que va a leer su libro *Misterium cosmographicum* «con tanta atención como la que le he dedicado a la teoría de Copérnico desde hace años». Y prosigue:

> He descubierto, a partir de esta hipótesis [copernicana], la causa de muchos efectos naturales que son seguramente inexplicables mediante la hipótesis común; he articulado muchas demostraciones y preparado la refutación de muchos argumentos contrarios, pero hasta el presente no me he atrevido a publicar nada de ello.

El telescopio revertiría radicalmente esta actitud.

ESTANCIA EN PADUA

Como confesaría posteriormente, su estancia en Padua, ciudad en la que vivió durante unos veinte años, fue la más feliz de su vida. Consiguió la cátedra de Matemáticas en 1592 gracias a la intermediación de Paolo Sarpi (1552-1623), sacerdote y gran amigo de Galileo, que logró que el senado veneciano lo contratara como profesor.

Galileo se introdujo en el círculo de amistades de Gian Vincenzo Pinelli (1535-1601), humanista que poseía una de las bibliotecas más nutridas de la época y que era capaz de atraer a intelectuales de la talla de Giordano Bruno. También conoció a quien sería uno de sus mejores amigos, el noble veneciano Giovanni Francesco Sagredo (1571-1620), joven alegre que Galileo inmortalizaría como uno de los interlocutores de los diálogos que escribiría posteriormente. Sagredo pertenecía a la nobleza y era conocido por las fiestas que organizaba en su palacio. Durante este período, Galileo trabajó resolviendo problemas de temática militar, relacionados, por ejemplo, con la arquitectura o la balística. Solo un incidente vino a turbar la alegre estancia en la ciudad: la muerte de Giordano Bruno, ocurrida en 1600.

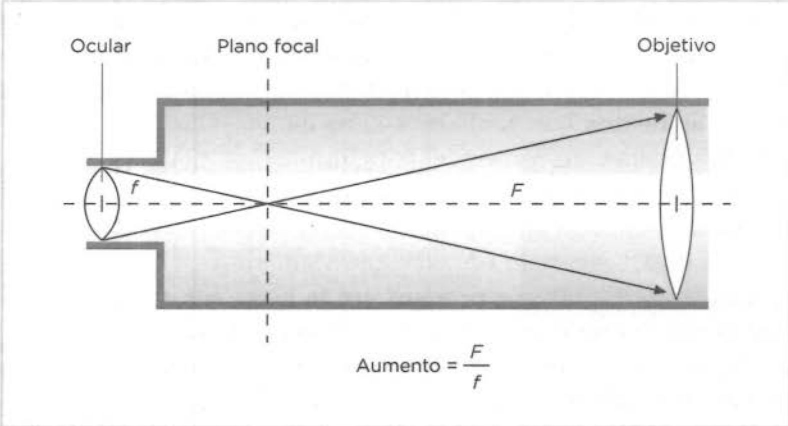
Durante una noche de diversión en Venecia, Galileo conoció a Marina Gamba (1570-¿1612?), una joven de veintiún años (catorce menos que él), analfabeta y probablemente prostituta. Aca-

baron conviviendo en casa de Galileo, sin llegar a casarse, y tuvieron tres hijos: Virginia, nacida en 1600 y que posteriormente se haría monja con el nombre de sor Maria Celeste; Livia, nacida al año siguiente y que también se haría monja, y Vincenzo, nacido en 1606. Galileo no reconoció la paternidad de ninguno de ellos, aunque siempre mantuvo el contacto, y sus criados se convirtieron en los padrinos de sus hijos.

En 1604, la aparición de una nueva supernova, igual que la que divisaron en 1572 Brahe y Digges, irrumpió en la constelación de Sagitario y despertó un gran interés entre astrónomos e intelectuales. Galileo sintió una gran curiosidad por este fenómeno, y la observación detallada de la nueva estrella se convirtió en su primer trabajo astronómico. Como resultado de su estudio impartió algunas conferencias, con las salas abarrotadas, sobre la naturaleza del nuevo astro. También redactó varios escritos, como el *Discurso en torno a la nueva estrella*, en los que polemizó con los aristotélicos. Otro de estos escritos, *Consideraciones de Alimberto Mauri* (escrito con pseudónimo), fue usado en su contra años más tarde al ser acusado ante la Inquisición. El ocaso de una época empezaba a vislumbrarse cuando en 1607 Sarpi estuvo a punto de morir asesinado y posteriormente su amigo Sagredo marchó de Venecia después de ser nombrado diplomático en Siria. Sin embargo, antes de que diera por concluida su estancia en Padua, su uso del telescopio le convertiría en el científico más célebre de Europa.

EL TELESCOPIO

En 1608, Sarpi obtuvo información sobre un instrumento óptico que un fabricante de lentes, el alemán residente en los Países Bajos Hans Lipperhey (1570-1619), había tratado de patentar sin éxito (en pocas semanas varias personas se atribuyeron tal invención). Se cuenta que fueron los hijos de Lipperhey quienes, jugando con lentes de desecho, encontraron la combinación por la que podían agrandar objetos. Pronto se halló una importante aplicación en el terreno militar, dado que el invento permitiría divisar a los enemigos con la suficiente antelación como para preparar la defensa.



El telescopio usado por Galileo es del tipo refractor. La refracción de la luz en la lente del objetivo hace que los rayos paralelos, procedentes de un objeto muy alejado, converjan sobre un punto del plano focal. Esto permite mostrar los objetos lejanos mayores y más brillantes. El aumento se calcula dividiendo la distancia del objetivo al plano focal *(F)* por la distancia entre el ocular y el plano focal *(f)*.

Al igual que otros astrónomos de la época, Galileo quiso tener su propio telescopio, por lo que se puso manos a la obra. El de Galileo tenía como objetivo una lente convexa, y como ocular, una lente cóncava. Sus primeros modelos lograron mejorar los originales neerlandeses, ya que, tras algunas pruebas, logró nueve aumentos, mientras que aquellos tenían entre tres y cuatro aumentos. Lo logró gracias a unas lentes más pulidas y a su familiaridad con la óptica práctica, que le permitió aplicar un método, usado por los fabricantes de gafas, basado en la curvatura de la lente.

Con la ayuda de Sarpi, Galileo trató de realizar una demostración para el senado veneciano, que veía en el invento grandes posibilidades para divisar enemigos desde la costa. Tras la demostración, que fue todo un éxito, Galileo hizo gala de su picaresca al donar los derechos de manufactura del instrumento a la república veneciana a cambio de una sustancial mejora de su salario, que se elevó hasta los mil florines, y a una mejor posición en la universidad, donde se le ofreció una cátedra vitalicia. En realidad, Venecia no podía impedir que cualquiera pudiese fabricar telescopios, y de hecho ya existían por toda Europa fabricantes de lentes para catalejos.

Una vez satisfecho su afán económico, Galileo perseveró en la constante mejora de su telescopio. De sus primeros intentos, pasó en 1609 a construir uno de veinte aumentos, con el que ya estaba preparado para llevar a cabo algunos de sus espectaculares

descubrimientos, jamás vistos hasta entonces, y que contribuyeron a que la Tierra recibiera la consideración de planeta semejante a los demás. Galileo logró disponer de un telescopio de hasta treinta aumentos.

LA LUNA

El honor de divisar por primera vez la Luna con un telescopio corresponde al astrónomo inglés Thomas Harriot (1560-1621), quien en 1609 ya hizo numerosas observaciones que plasmó en dibujos, tal como lo haría Galileo meses más tarde. Entre astrónomos nació una creciente competencia, lo que explica todas las artimañas de las que se sirvió Galileo para dar publicidad a sus descubrimientos antes que nadie.

El estudio de la Luna que hizo Galileo fue sistemático, y abarcó todas sus fases. Uno de los primeros aspectos que más le llamaron la atención fue que la superficie, con montañas y valles, era semejante a la Tierra, y no esa esfera pulida imaginada por los aristotélicos. Eso significaba que muy posiblemente estuviera hecha de un material semejante a los existentes en la superficie terrestre (en todo caso, nada parecido a una quintaesencia incorruptible).

En los dibujos que Galileo hizo con gran detalle de la superficie lunar se observan, en las zonas de sombra, algunos puntos brillantes. Galileo los interpretaba como montañas cuya cima tenían que alcanzar antes los rayos del Sol. Incluso llegó a elucubrar sobre la altura de dichas montañas (hoy se sabe que las montañas de la Luna tienen alturas semejantes a las de la Tierra). La evidencia de montañas también se reflejaba en las irregularidades del terminador (la línea que separa la zona iluminada de la región oscura lunar).

Otro de los problemas respecto a la Luna sobre los que reflexionó Galileo se refiere a su luz secundaria. En fase creciente, hay una zona que brilla porque recibe directamente los rayos del Sol, mientras que el resto tiene un ligero resplandor, gracias al cual se aprecia perfectamente su contorno. Galileo descartó posibles hipótesis, por ejemplo, que dicha luz procedía de la propia Luna o bien de las estrellas, y posteriormente defendió la teoría

LAS ENSOÑACIONES LUNARES DE KEPLER



Johannes Kepler estuvo siempre al corriente de los avances realizados por Galileo, quien a su vez procuraba mantenerlo informado, aunque prudencialmente, dado que lo consideraba un competidor directo. Respecto a la Luna, el astrónomo alemán planteó numerosas elucubraciones a partir de la póca información que poseía. Por ejemplo, las formas redondas de la superficie lunar podían ser un indicio de que el astro estaba hecho de un material poroso. Esto explicaría que fuera más ligera y, por esa razón, más fácil de arrastrar por nuestro planeta. Para Kepler, la idea de que la Luna estuviera poblada era una posibilidad sumamente real. Incluso llegó a especular que algunas formas observadas en la superficie del satélite terráqueo tenían que ser fruto de seres inteligentes, construcciones ideadas para escapar del Sol: «Puesto que tienen un día cuya duración es igual a la de quince terrestres y han de experimentar un calor insoportable, [...] su forma usual de edificar podría consistir en disponer gigantescas planicies hundidas sacando tierra de un círculo y amontonándola anularmente a su alrededor. [...] Podría haber una especie de ciudad subterránea: las casas serían numerosas cuevas excavadas en aquellas».

más convincente, exponiendo que se trataba de luz reflejada por la Tierra. De la misma manera ocurre al revés: en luna llena, su brillo ilumina la Tierra de noche.

LAS ESTRELLAS

Al apuntar en dirección a las estrellas, una de las primeras sorpresas para el científico pisano fue darse cuenta de que a través del telescopio se veían más pequeñas. Este espejismo se produce,

como se sabe bien en la actualidad, porque la atmósfera magnifica dicho tamaño, mientras que al mirar por el telescopio tal fenómeno desaparece.

A la vez que reduce su tamaño relativo, el telescopio también multiplica el número de estrellas, si bien, al contrario de lo que ocurre con los planetas, no se ven aumentadas ni se aprecian los detalles. En Orión pudo observar centenares de estrellas que no podían verse a simple vista. Lo que para Ptolomeo tomaba la apariencia de nebulosas, Galileo pudo apreciar que se trataba de miles de estrellas juntas.

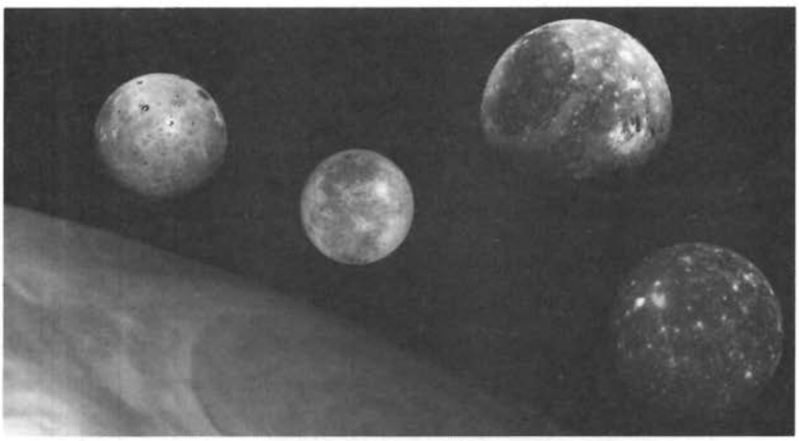
Sería obvio pensar que la cantidad de estrellas observables con el telescopio y la inmensidad del universo conducirían a Galileo a conclusiones semejantes a las de Bruno. ¿Se encontraban todas las estrellas a la misma distancia? ¿O bien se hallaban desparramadas por la inmensidad del cielo? Una de las objeciones astronómicas al movimiento terrestre era la ausencia de efectos visibles en la observación de las estrellas, es decir, no se apreciaba paralaje. Se trataba de una razón contundente contra el movimiento de la Tierra, pero que podía superarse demostrando que las estrellas se encontraban lo suficientemente lejos como para que tal efecto no fuera observable. Sin embargo, ya sea por el dramático desenlace del caso de Bruno o por cualquier otra razón, Galileo se mostró cauto respecto a las especulaciones sobre la infinitud del universo.

LOS SATÉLITES DE JÚPITER

Uno de los principales descubrimientos de Galileo fueron los satélites de Júpiter. Relata su descubrimiento en el *Sidereus nuncius*, una de las obras que publicó con gran celeridad para dar a conocer sus descubrimientos antes que nadie. Según explica, en enero de 1610 enfocó un telescopio nuevo hacia Júpiter, y se fijó que estaba flanqueado por tres estrellas. Durante los siguientes días pudo comprobar con sorpresa que dichas estrellas se movían, y muy pronto pudo observar una cuarta estrella, que luego aparecían y desaparecían intermitentemente. Su número y posi-

LOS SATÉLITES GALILEANOS

Los satélites de Júpiter descubiertos por Galileo, también llamados *satélites galileanos*, son concretamente Ío, Europa, Ganímedes y Calisto. Se trata de nombres extraídos de la mitología griega. Galileo los denominó con los nombres de Júpiter I, Júpiter II, Júpiter III y Júpiter IV; fue Simon Marius (1573-1624), un astrónomo alemán coetáneo de Galileo, el que les dio su nombre definitivo (aunque la nomenclatura se impondría solo a partir de mediados del siglo XX). Se trata también de los cuatro satélites más grandes de los 64 que orbitan alrededor del planeta gigante; de hecho, Ganímedes es el mayor satélite de todo el sistema solar. Ío es el satélite más cercano a Júpiter y tiene una gran actividad volcánica: se han detectado en su superficie unos cuatrocientos volcanes activos. Europa está cubierto por una capa de hielo, en cuyo interior hay un océano líquido, uno de los lugares del sistema solar donde los astrobiólogos piensan que puede haber vida. Respecto a Ganímedes, se cree que podría tener placas tectónicas, así como un núcleo metálico (lo que haría que fuera un satélite activo). Su superficie se caracteriza por tener una enorme extensión ovalada y oscura denominada Galileo Regio. Calisto, un satélite compuesto por roca y hielo, cuenta con una superficie repleta de cráteres. Para los astrónomos, es uno de los lugares óptimos para instalar una futura base humana. Todos estos datos se conocen gracias a varias misiones de la Nasa, como la Pioneer 10 y 11, o la Voyager 2. La misión más reciente en llegar hasta Júpiter e incluso penetrar en su atmósfera fue la sonda Galileo en 1990.



Composición que muestra los cuatro satélites galileanos (de izquierda a derecha): Ío, Europa, Ganímedes y Calisto.

ción variaba, pero siempre se barajaban en cuatro. ¿Cómo interpretar dichas observaciones? Se trataba de un trabajo detectivesco y es posible que Galileo reprodujera razonamientos semejantes a Sherlock Holmes: «Una vez descartado lo imposible, lo que queda, por improbable que parezca, ha de ser la solución». Y lo probable es que tales astros fueran satélites de Júpiter, como así se demostró tras infinidad de observaciones.

Las pequeñas estrellas observadas por Galileo (la denominación de *satélite* la daría Kepler con posterioridad) constituían un descubrimiento asombroso. Era la primera vez que se observaban satélites en un planeta que no fuera la Tierra, y esto daba un espaldarazo al heliocentrismo. Los geocentristas siempre señalaban, con razón, la anomalía que suponía que el único astro que giraba alrededor de la Tierra fuera la Luna. Al demostrar que otros planetas estaban igual de acompañados, se desactivaba la crítica, y el modelo heliocéntrico podía aplicarse sin incoherencias.

Galileo bautizó los satélites con el nombre de *mediceos* (por la familia Médici, a la que Galileo quería rendir tributo). Su aspiración era lograr que los Médici lo acogieran bajo su protección, y así incrementar aún más su salario.

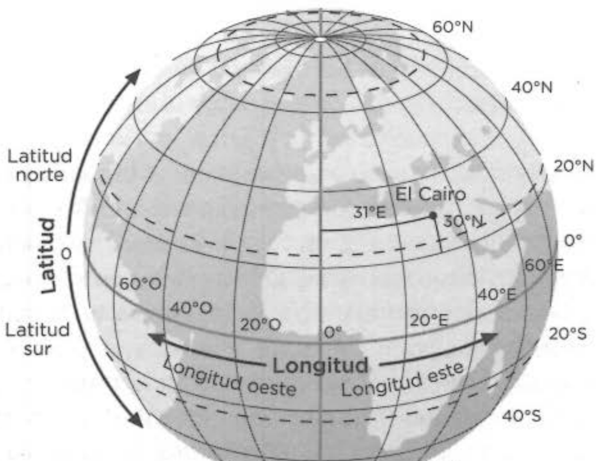
LA LONGITUD

Galileo estaba siempre interesado en hallar una utilidad a sus descubrimientos, y pensó que los satélites de Júpiter podían contribuir a resolver uno de los grandes problemas que habían tenido los marinos y comerciantes: establecer la longitud geográfica. La longitud se había convertido en un problema de Estado. Los barcos extraviados durante las largas travesías, con no pocas pérdidas humanas y materiales, convertían la determinación correcta de la longitud en un asunto angustioso y vital. Por esa razón, el rey de España Felipe III ofreció una suculenta recompensa a quien resolviera el problema de la longitud.

Galileo se animó a convertir los satélites de Júpiter en las manecillas de un reloj capaz de señalar la longitud en medio de los

EL PROBLEMA DE LA LONGITUD

Para saber la posición exacta que se ocupa en un globo como el terráqueo, es necesario determinar la latitud y la longitud. La latitud se determina mediante un cálculo sencillo cuya solución se conocía desde siglos atrás. Este valor, en el que se determina la altura en la que uno se encuentra en el globo terráqueo entre el polo y el ecuador, se lograba, por ejemplo, al calcular la altura del Sol o bien al determinar el ángulo que forma la estrella polar con el horizonte (para lo que se podía usar un astrolabio). La longitud, sin embargo, es una medida angular que antaño carecía de método para establecerse. Si nos dirigimos hacia el Este en línea recta, cada 15° de longitud recorridos tendremos que retrasar una hora nuestro reloj, mientras que hacia el Oeste, habrá que adelantarlo una hora. Como la hora local es fácil de determinar, a partir de la altura del Sol o de la posición de las estrellas, entonces el problema de la longitud se reduce a saber la hora en otro punto que se tome como referencia. Trasladar dicha hora mediante un reloj de péndulo era inviable. Por esa razón, el problema de la longitud solo se pudo resolver con la invención del cronómetro, que realizó John Harrison (1693-1776). Su primer cronómetro data de 1759. Desde 1884 existe la convención de dividir el globo terráqueo en husos horarios, como si fueran gajos de una naranja, tomando como referencia el meridiano de Greenwich. Cada huso horario corresponde a una diferencia de una hora, es decir, 15° de longitud.



océanos. Estos satélites sufren un millar de eclipses anuales, lo que significa que como mínimo se divisa uno cada noche del año (la media es de tres). Creando tablas desde un punto de referencia con el momento exacto en el que tenían que ocurrir los eclipses, los marineros podían restar dicho valor a la hora donde se encontraran, y así deducir la longitud.

El siguiente problema a resolver era de tipo técnico: ¿Cómo asegurarse que los marineros observaran correctamente los eclipses lunares? Galileo inventó para ello el *celatone*, un casco al que iba atado un telescopio y que tenía la función de garantizar estabilidad durante la observación. Sin embargo, el intento fue un fracaso. Los simples latidos del corazón desestabilizan lo suficiente como para perder el enfoque de las lunas, de modo que con un poco de oleaje no había marinero capaz de enfocar correctamente y deducir así la longitud. Galileo se esforzó en vender su invento e incluso hizo demostraciones prácticas en las que uno de sus ayudantes zarpó con un barco, pero no convenció a nadie de su utilidad.

VENUS, SATURNO... ¿Y URANO?

El descubrimiento de las fases de Venus (1610) tuvo también una gran importancia en el debate sobre el sistema del mundo. Se trata de fases semejantes a las de la Luna, en las que se puede distinguir una fase creciente, plena, menguante y llena. Tales fases solo podían interpretarse como que había momentos en los que Venus quedaba detrás del Sol en relación con la Tierra y, por tanto, resultaba invisible, mientras que en otros quedaba delante del Sol y, en función del ángulo con la Tierra, podía verse iluminado de manera distinta.

Galileo también logró observar Saturno y las extrañas anomalías que presentaba, que no supo interpretar como los anillos del planeta. Para Galileo eran unas manchas, en forma de asas, que lo acompañaban y que de repente desaparecían. En un principio Galileo pensó que podía tratarse de satélites, pero acabó rechazando la idea. La poca potencia de su telescopio le impidió observar los

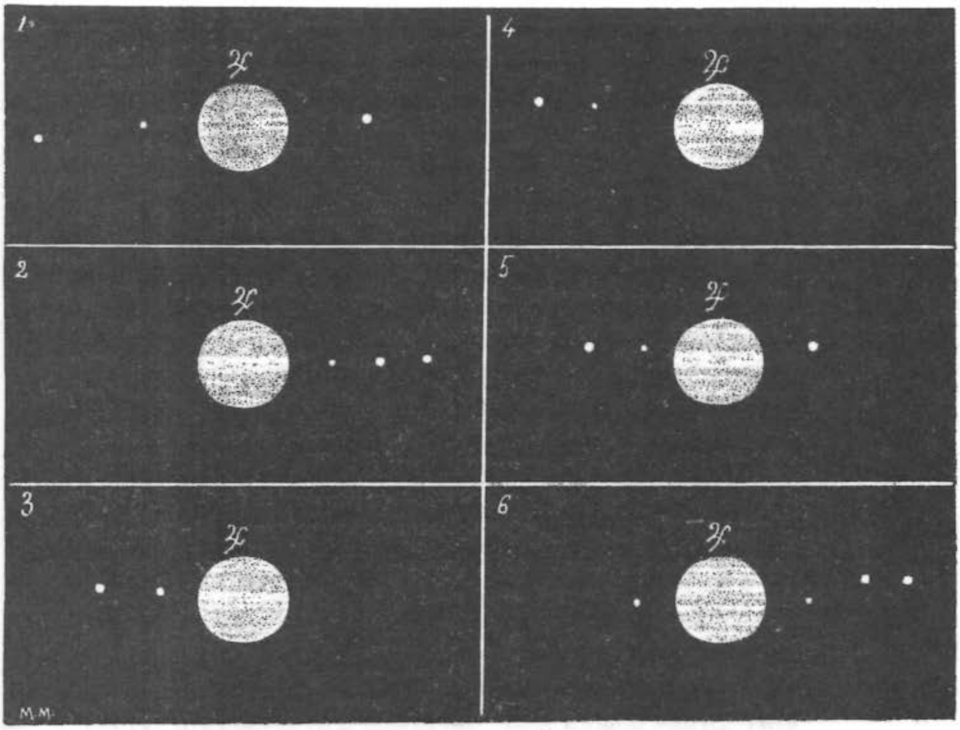




FOTO SUPERIOR:
El telescopio permitió a Galileo llevar a cabo descubrimientos impactantes, como el de los satélites de Júpiter. Estos dibujos que los reproducen están extraídos de su obra *Sidereus nuncius*.

FOTO INFERIOR:
Demostración, en la torre de San Marcos de Venecia, de las posibilidades militares que ofrecía el telescopio.

anillos de Saturno, que en determinadas épocas del año forman un ángulo que los hace casi invisibles desde la Tierra.

Galileo no podía publicar un descubrimiento sin tener claro de qué se trataba. Pero por otro lado, cuanto más tiempo tardase en publicarlo, más riesgo corría de que otro astrónomo se le adelantase. Por esa razón, se le ocurrió un procedimiento por el que se aseguraba la paternidad del descubrimiento sin desvelar un ápice de su contenido: envió al secretario del gran duque de Toscana un anagrama que escondía la noticia de su descubrimiento y lo animaba, a él y a otros astrónomos como Kepler, a que desvelara su contenido, lo que era casi imposible por el elevado número de combinaciones. El anagrama rezaba el siguiente galimatías: «SMAISMRMILMEPOETALEUMIBVNENUGTTAVIRAS».

Meses más tarde acabó por desvelar su significado: «ALTISSIMUM PLANETAM TERGIMINUM OBSERVAVI». O lo que es lo mismo: «Observé que el planeta más alto [en referencia a Saturno] era triple».

El historiador Stillman Drake (1910-1993) asegura que Galileo también observó Urano, aunque lo confundió con una estrella; finalmente fue descubierto por William Herschel (1738-1822) en 1781. Drake llegó a esta conclusión tras estudiar detenidamente los cuadernos de Galileo y apreciar que sus anotaciones coincidían con la época en la que Urano tendría que estar oculto por Saturno. Efectivamente, una de las estrellas dibujada por Galileo se corresponde en realidad con el planeta Urano.

Otro de los aspectos que Drake puso sobre la mesa es la extrema precisión de las observaciones de Galileo. Según este autor, para obtener estos resultados Galileo usaba un aparato al que solo hace una vaga referencia; de hecho, fue un discípulo suyo quien hizo una descripción más completa. El dispositivo en cuestión era muy sencillo: consistía en colocar una rejilla sujeta al telescopio al lado del objetivo. De este modo, al mirar con un ojo por el ocular y mantener el otro abierto mirando el retículo conseguía crear un efecto de rejilla similar al que consiguen los instrumentos micrométricos. Tal como explica el propio Galileo, el instrumento servía «para medir intervalos y distancias de manera exacta».

GALILEO, KEPLER Y LOS ANAGRAMAS

En dos ocasiones, Galileo escondió sus descubrimientos en anagramas. Kepler fue uno de los astrónomos más interesados en desvelar lo que ocultaban estos mensajes secretos. Curiosamente, dio interpretaciones diferentes a las que pretendía Galileo, pero posteriormente se ha descubierto que eran correctas desde un punto de vista físico. El anagrama es un juego en el que aparecen unas letras desordenadas y hay que colocarlas en su orden correcto para encontrar el significado oculto. Para el primer anagrama de Galileo sobre Saturno, Kepler ordenó las letras de la siguiente manera: «*Salve umbistineum geminatum martia proles*», es decir: «Salve, ardientes guerreros hijos de Marte». Según Kepler, el descubrimiento de Galileo hacía referencia a dos satélites de Marte. Aunque su interpretación era errónea, en 1877 se observó que Marte tenía dos lunas, Fobos y Deimos. Sobre las fases de Venus, Galileo, por su falta de seguridad, también las anunció con un anagrama: «HAEC IMMATURA A ME IAM FRUSTRA LEGUNTUROY», que textualmente significa: «En vano he leído prematuramente». Kepler encontró ocho posibles combinaciones con sentido, aunque ninguna era la solución pretendida por Galileo. Lo más curioso de todo esto es que Kepler propuso la siguiente solución (entre ocho posibles, todas ellas erróneas): «*Macula rufa in jove est, gyratur mathem, etc.*», cuya traducción sería: «En Júpiter hay una mancha que gira matemáticamente». En la actualidad, todos hemos visto la mancha de Júpiter, pero se ignoraba su existencia cuando Kepler dio esta solución: se observó por vez primera en el siglo XIX.

EL SOL

Una de sus observaciones más destacadas y polémicas fue la de las manchas solares, que llevó a cabo a principios de 1611. Para lograr observarlas, no podía mirar directamente al Sol con el telescopio, ya que dada la gran cantidad de luz que emite, se hubiera quedado ciego. Para este tipo de observaciones, lo habitual es usar un procedimiento indirecto, llamado *método de la proyección*, que consiste en enfocar el telescopio hacia el Sol y proyectar la imagen que sale del ocular en una superficie blanca. En el caso de que haya manchas, se pueden observar en dicha superficie como regiones más oscuras. Galileo logró apreciar las manchas solares usando métodos parecidos, e incluso se dio cuenta de su constante actividad, movimiento y variabilidad. No fue el primero: hay constancia

de que ya se habían percibido manchas en el Sol siglos atrás, e incluso se considera que el astrónomo Thomas Harriot (1560-1621) pudo haber sido el primero en observarlas usando un telescopio.

Estas observaciones generaron algunas controversias interesantes. Hubo intérpretes que consideraban que las manchas podían ser cuerpos situados entre el Sol y la Tierra, y las manchas serían entonces sombras proyectadas. Con el apodo de *Apelles*, Christoph Scheiner (1573-1650) publicó unas cartas con esta interpretación. Cuando llegaron a sus manos, Galileo quiso responder a su vez con otro conjunto de cartas que publicó con el título de *Historia y demostraciones en torno a las manchas solares* (1613), en las que demostraba geométricamente que estas manchas tenían que encontrarse en la misma superficie solar. Por la progresión de las manchas llegó a pronosticar que el Sol giraba sobre sí mismo mensualmente.

En el fondo del asunto se encontraban los intentos de los partidarios del aristotelismo de salvaguardar la pureza e incorruptibilidad del astro solar, una concepción que era incapaz de asumir que hubiera manchas. Era una observación más que ponía de manifiesto la insostenibilidad de las ideas aristotélicas.

«SIDEREUS NUNCIUS»

Un capítulo aparte merece el *Sidereus nuncius*, obra que podría traducirse como *Mensajero* (o *Mensaje*) *sideral*, publicada en 1610. Galileo pronto se dio cuenta de la importancia de sus observaciones y de la necesidad de darlas a conocer, así como la de atribuirse la prioridad en los descubrimientos. Cualquier astrónomo con un telescopio podía adelantársele, por lo que creyó que era urgente preparar un librito breve en latín con tales descubrimientos. Además de descripciones, añadió dibujos muy detallados de la Luna y de Júpiter y sus satélites, así como de algunas de las estrellas observadas. Tal como explicó su biógrafo Vincenzo Viviani (1622-1703):

> Todos estos descubrimientos los hizo en el mes de enero del año 1610 y, tras proseguir sus observaciones a lo largo de todo el si-

guiente mes de febrero, pronto las dio a conocer al mundo con su *Sidereus nuncius*, que hizo imprimir en Venecia a comienzos del mes de marzo.

La recepción del libro fue espectacular, y por ese motivo está considerado como la obra más influyente del siglo XVII. Fue también motivo de polémicas y disputas. Ilustres humanistas y matemáticos negaron en un principio la veracidad de sus descubrimientos, aunque otros, como el jesuita Christopher Clavius, finalmente acabaron por reconocer la fortaleza de las pruebas presentadas.

El profesor de astronomía Francesco Sizzi trató de desacreditar los descubrimientos de Galileo recurriendo a razonamientos circulares como el siguiente: «Las lunas de Júpiter son invisibles a simple vista y, por tanto, no pueden tener influencia sobre la Tierra y, por tanto, serían absolutamente inútiles y, por tanto, no existen». Hubo otros profesores, como su amigo Cesare Cremonini (1550-1631), que simplemente rechazaron la invitación de mirar por el telescopio. Estaban cómodos con el mundo tal como se lo imaginaban y no querían que nada turbara esa visión. Fue un libro que no dejó indiferente a nadie.

A pesar de los honores que la República de Venecia le había concedido, Galileo no tuvo ninguna duda en dedicar el libro a Cosme II de Médici, el gran duque de Toscana, y también en bautizar los satélites como *mediceos*. Quería ganarse los favores y el reconocimiento del príncipe, pues tenía claro que quería regresar a Florencia. Previamente le había regalado su mejor telescopio y se ofreció a enseñarle su manejo y mostrarle los satélites de Júpiter con su ayuda. Tras algunas negociaciones, Galileo logró uno de los mejores contratos que nadie de la época podía llegar a aspirar. En julio de 1610 abandonaba Padua para convertirse en el filósofo y matemático del gran duque de Toscana. En su regreso a Florencia, se llevó consigo a sus dos hijas, y dejó atrás a su hijo Vincenzo junto a su madre Marina.

CAPÍTULO 3

El nacimiento de la física moderna

Galileo fue capaz de sintetizar todo el conocimiento que había adquirido sobre el movimiento de los cuerpos —ya fuera uniforme o acelerado— y la trayectoria de los proyectiles en uno de sus libros más decisivos para la posteridad, *Discursos y demostraciones matemáticas*. En la actualidad las ideas de Galileo forman parte de todos los manuales introductorios a la física.

La mecánica fue un interés temprano de Galileo que cultivó a lo largo de toda su vida. Se vio obligado, gracias a los experimentos, a modificar sus hipótesis, en una constante pugna entre el ensayo y el error hasta que finalmente alcanzó unos resultados que siguen teniendo validez. Su estudio del movimiento sirvió, además, de apoyo en su cruzada contra el geocentrismo: el heliocentrismo requería una nueva física, y Galileo edificó sus cimientos.

Tal como ocurre con el resto de las aportaciones científicas de Galileo, las ideas aristotélicas sobre el movimiento constituían la tierra que había que labrar para permitir que germinaran las nuevas ideas. Era también el pensador con el que se veía obligado a confrontarse y a dialogar. El modo de trabajar arquimediano pudo tener una gran influencia, sobre todo al principio de su obra, para desmarcarse de los errores que se derivan del pensamiento aristotélico.

EL MOVIMIENTO SEGÚN ARISTÓTELES

El filósofo griego distinguía entre movimiento y reposo. Se trataba de estados absolutos, radicalmente diferenciados. También hacía distinción entre dos tipos de movimiento: los naturales y los vio-

lentos. Tal como ya se ha explicado, el movimiento natural es aquel que manifiestan los cinco elementos: aire, agua, tierra, fuego y éter. El movimiento propio del éter, la sustancia de las esferas celestes, es eterno y circular. El resto de los elementos manifiesta un movimiento rectilíneo en sentido ascendente (aire y fuego) o descendente (agua y tierra). El movimiento natural se explica entonces por la tendencia interior de cada elemento a ocupar su lugar natural y restaurar el orden perdido de las cosas. Una vez alcanzado su lugar, permanecen en reposo.

Los movimientos violentos, por el contrario, son aquellos que se producen de forma no natural y alejan al cuerpo del lugar que le es propio, como es el caso de una piedra ascendiendo al arrojarla con la mano. Como todo efecto tiene una causa, se deduce que el movimiento violento siempre está ligado a la fuerza que lo ha causado. Esta fuerza se ejerce siempre por contacto entre el motor del movimiento y el cuerpo movido. Para Aristóteles no puede existir nada parecido a una acción a distancia. Sin embargo, el movimiento de un proyectil parece desafiar la teoría aristotélica. Cuando una piedra sale disparada de una mano, llega un momento en que ya no hay contacto entre el motor y el objeto movido. La cuestión, entonces, es la siguiente: ¿cómo se explica que el objeto siga su trayectoria? Aristóteles se vio obligado a explicar dicho movimiento argumentando que era el propio medio, el aire, el que transmitía el movimiento al objeto: el motor inicial —la mano— mueve el cuerpo lanzado y, además, las capas de aire que están a su alrededor, de modo que son tales capas las que actúan como nuevo motor y transmiten el movimiento al objeto. Lo que conduce a la paradójica conclusión de que el medio no solo actúa presentando resistencia al movimiento, sino también como motor del mismo.

Aristóteles llegó a establecer una correlación entre incremento de fuerza e incremento de velocidad. Expresado en notación actual, si F es la fuerza y v la velocidad, entonces:

$$F \propto v,$$

es decir, F es proporcional a v. Si se tiene en cuenta la resistencia del medio, esta actúa también de forma inversamente proporcio-

nal a la velocidad: a mayor resistencia, menor velocidad. Expresado de nuevo en términos actuales, se obtiene la siguiente expresión:

$$v \propto \frac{F}{R},$$

es decir, la velocidad es proporcional a la razón entre la fuerza y la resistencia.

Otro de los pilares de la física aristotélica era su rechazo del vacío. La ausencia de materia supondría que los cuerpos al moverse no encontrarían resistencia que los frenara. La velocidad que alcanzaría el objeto sería infinita e instantánea, lo cual era inadmisible.

Las ideas aristotélicas concuerdan con el sentido común. Si imaginamos un carro empujado por un caballo, este carro solo se moverá cuando el caballo empuje con más fuerza que la resistencia del medio. Al incrementar la fuerza, aumentará la velocidad, y

LA IMPOSIBILIDAD DEL VACÍO DEMOSTRADA MATEMÁTICAMENTE

Si las ideas aristotélicas se expresan con notación matemática, se puede llegar a demostrar la imposibilidad del vacío, tal como el propio Aristóteles defendía. Según el filósofo griego, para que se produzca movimiento la fuerza (F) ha de ser mayor que la resistencia (R) del medio. La velocidad (v) que alcance el cuerpo será directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la resistencia, de modo que:

$$v = k\frac{F}{R},$$

donde k es una constante de proporcionalidad. Según esta expresión, si la resistencia fuera igual a cero (es decir, equivalente al vacío) en ese caso se obtendría una velocidad infinita, y el movimiento sería instantáneo. Con toda coherencia, Aristóteles consideraba que esta conclusión era absurda, de modo que era necesario rechazar el vacío y considerar que el universo es pleno. Se trata de un razonamiento válido que lo único que demuestra es que las premisas de las que parte, y su consiguiente conclusión, son erróneas.

esta a su vez se reducirá cuando la resistencia sea mayor (un terreno en mal estado, por ejemplo).

Todos los objetos son una mezcla de los cuatro elementos sublunares; en función de la proporción en que cada uno de ellos esté presente, el objeto será más pesado o más liviano. Cuanto más pesado sea, mayor velocidad alcanzará en caída libre. De nuevo Aristóteles hace afirmaciones mil veces corroboradas por la experiencia, dado que todo el mundo ha visto que una pluma siempre tarda más en caer que una bola de hierro. Esta conclusión errónea, sin embargo, se convirtió en una de las grietas que conducirán a cuestionar todo el edificio aristotélico.

LO LIGERO Y LA CAÍDA LIBRE

La obra *De motu (Sobre el movimiento)* es un diálogo escrito en latín por Galileo cuando fue profesor en Pisa. Nunca llegó a publicarse. Probablemente se sintió insatisfecho con las conclusiones alcanzadas, a pesar de que históricamente tienen un gran interés porque permiten percibir la evolución de su pensamiento. En todo caso, ya se muestra sumamente crítico con la autoridad representada por Aristóteles, como, por ejemplo, en su distinción entre la cualidad de pesado y la de ligero. Para Aristóteles existe por un lado la pesadez y por otro la ligereza. Se trata de cualidades opuestas que pueden caracterizar una sustancia cualquiera. Galileo, por el contrario, rechazará que exista nada parecido a lo ligero. El término «ligero» no alude a ninguna cualidad real del objeto, sino que es un adjetivo equivalente a «menos pesado». Al suprimir la ligereza, el estudio del movimiento se torna más sencillo.

Galileo expuso una situación imaginaria para demostrar que los planteamientos aristotélicos conducían al absurdo. Como ya se ha dicho antes, Aristóteles considera que la velocidad de caída libre es directamente proporcional al peso del cuerpo (donde el peso es la fuerza que actúa) e inversamente proporcional a la resistencia del medio.

Supongamos que tenemos dos cuerpos homogéneos y que uno de ellos tiene un volumen mayor que el otro (figura 1). Según Aristóteles, el objeto con mayor volumen caerá más deprisa. Si se unen ambos cuerpos mediante una vara (figura 2), se podría suponer que la velocidad alcanzada por la unión de los objetos será menor que la del cuerpo más voluminoso, y mayor que la del menos voluminoso, pues el cuerpo menor restaría velocidad a la caída. Es decir, su velocidad de caída sería la velocidad media. Sin embargo, el nuevo cuerpo es más voluminoso que los dos anteriores, por lo que se tendría que concluir que caería a mayor velocidad que cualquiera de los otros dos objetos. De modo que se llega a conclusiones contradictorias partiendo de los mismos principios. Con este tipo de razonamiento tan ingenioso Galileo mostró otra debilidad más del sistema aristotélico.

FIG. 1

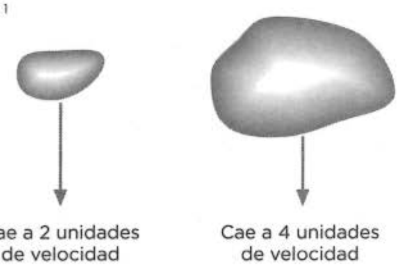
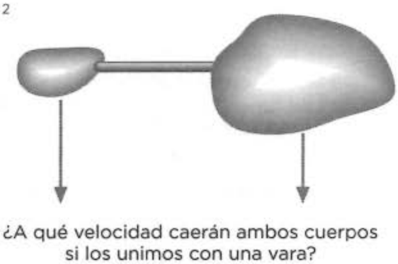


FIG. 2



EL PRINCIPIO DE INERCIA

Aristóteles concebía una física de lugares absolutos, con un centro del universo que ejercía como centro de gravedad. Suponer que dicho centro, la Tierra, estuviera en movimiento era totalmente absurdo por distintas razones, pero la más consistente y la que empleaban a menudo los seguidores del aristotelismo era la que se expone a continuación: en el caso de que la Tierra se moviera, al arrojar un objeto pesado desde una torre alta, durante el descenso

UN PLANETA A TODA VELOCIDAD

En la actualidad se sabe que en el ecuador la rotación terrestre alcanza los 460 m/s, y la velocidad de traslación del planeta alrededor del Sol es de 30 km/s. Además, todo el sistema solar se ve arrastrado por el movimiento de rotación de la Vía Láctea, cuya velocidad es de 270 km/s. A estos movimientos, en los que la Tierra se ve implicada, hay que añadir la velocidad de la propia galaxia a medida que se va acercando a galaxias próximas, como es el caso de Andrómeda. Desde 1986 se sabe que el Grupo Local, un conjunto de una treintena de galaxias que acompañan a la Vía Láctea, se dirige a una velocidad de 600 km/s hacia la constelación de Virgo. Esta velocidad resulta del todo anómala, solo explicable si se supone que en Virgo hay un impresionante conglomerado de materia, al que ya se le ha dado el nombre de Gran Atractor, que sería capaz de arrastrar a todo el Grupo Local hacia sus aledaños. Se cree que el superclúster Shapley —compuesto por 17 cúmulos de galaxias con su tirón gravitacional— también está dejando su impronta sobre el Grupo Local. El panorama se completa con la propia expansión del universo, que tiende a que todo se aleje entre sí. Como puede comprobarse, el universo se caracteriza por su gran dinamismo; nuestro planeta circula a toda velocidad por el espacio, aunque el sentido común nos diga otra cosa.

¿Existe un valor absoluto?

A tenor de todo lo expuesto, ¿cuál es entonces la velocidad de la Tierra? ¿Se podrían tener en cuenta todos estos movimientos para determinar su valor absoluto? Por definición, la noción de velocidad es relativa, lo que significa que solo se puede determinar a partir de un punto de referencia. En función de dicho sistema de referencia, se puede interpretar que un cuerpo está en movimiento o está en reposo en relación con el resto. La física clásica se fundamenta en la idea de que no existe un punto de vista absoluto para determinar posiciones o velocidades (lo que contrasta con la física aristotélica, que privilegia el punto central del universo sobre el resto).

la base de la torre se desplazaría, de modo que en ningún caso el objeto caería a los pies del edificio. Como, efectivamente, los objetos sí que caen en la base de los edificios, esto significa que la Tierra tiene que encontrarse inmóvil. Un simple lanzamiento de un objeto servía de prueba para demostrar la inmovilidad de la Tierra. Así expone el propio Galileo este problema en sus *Diálogos*, a través de Salviati, defensor del sistema copernicano:

> Todos plantean como el mejor argumento el de los cuerpos graves que, cayendo de arriba abajo, llegan por una línea recta y perpendicular a la superficie de la Tierra. Lo que se considera un argumento irrefutable de que la Tierra está inmóvil. Porque si esta tuviese la rotación diurna, una torre desde cuya parte superior se deja caer una piedra, al ser transportada por la rotación de la Tierra, en el tiempo que la piedra tarda en caer, recorrería muchos cientos de brazas hacia oriente, y la piedra debería caer a tierra lejos de la base de la torre en un espacio correspondiente.

Aunque los aristotélicos estaban convencidos de que este experimento era concluyente, Galileo pudo desenmascarar su error mediante el principio de inercia. Según este principio, se observaría lo mismo en una Tierra en movimiento que en una Tierra inmóvil, tal como se verá a continuación.

En esa misma obra, Galileo expone un segundo argumento contra la idea de la rotación terrestre, esta vez en boca del representante aristotélico Simplicio:

> [...] sostengo que si la Tierra se moviera, las piedras, los elefantes, las torres y las ciudades necesariamente volarían hacia los cielos. Y como esto no sucede, declaro que la Tierra no se mueve.

Se trata de una experiencia que seguramente hubieron experimentado los coetáneos de Galileo con frecuencia: al girar en rotación, una fuerza ficticia parece impulsarnos hacia el exterior. En este argumento hay implícita la fuerza centrífuga, sobre la que Galileo no pudo dar una contraargumentación convincente.

LA EQUIVALENCIA DE MOVIMIENTO Y REPOSO

En un famoso pasaje de los *Diálogos*, Galileo propone subirse a un barco en un mar en calma y observar atentamente los movimientos de moscas y gotas de agua. Expone la situación de la siguiente manera:

Encerraos con un amigo en la cabina principal bajo la cubierta de un barco grande, y llevad con vosotros moscas, mariposas y otros pequeños animales voladores [...] colgad una botella que se vacíe gota a gota en un amplio recipiente colocado por debajo de la misma [...] haced que el barco vaya con la velocidad que queráis, siempre que el movimiento sea uniforme y no haya fluctuaciones en un sentido u otro. [...] Las gotas caerán [...] en el recipiente inferior sin desviarse a la popa, aunque el barco haya avanzado mientras las

DE LA RELATIVIDAD GALILEANA A LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN

Los principios de Galileo se utilizan en la actualidad para tratar toda clase de problemas. Por ejemplo, supongamos que una persona viaja en un tren que va a velocidad constante y se encuentra sentada a una distancia x del inicio del vagón. Si un observador desde una estación desea determinar la posición de la persona (x') tomando como referencia dicha estación, entonces tendrá que usar el llamado *principio de transformación galileano*, en el que se requiere saber la velocidad del tren (v) y el tiempo transcurrido desde que el tren pasó por la estación (t):

$$x' = x + v_x \cdot t.$$

Para calcular las velocidades en sistemas de referencia distintos, se aplica una simple operación de adición. Como se observa en la figura, si un avión avanza sobre la cubierta de un portaaviones en movimiento, el aparato tendría una velocidad V_A respecto al buque, pero respecto a un observador externo que estuviera, por ejemplo, en una barca anclada, la velocidad del avión tendría que sumarse a la del portaaviones ($V = V_P + V_A$), en el caso de que ambos se movieran en la misma dirección y en el mismo sentido.

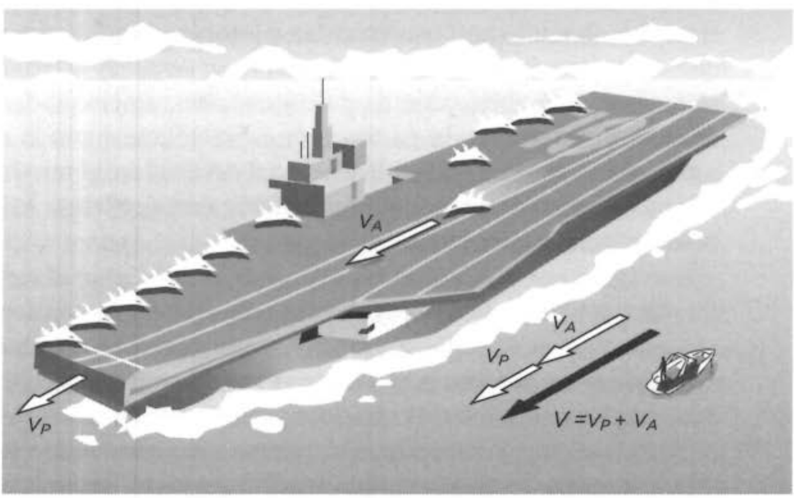
A la velocidad de la luz

El principio de adición de velocidades es válido aplicado a objetos que circulan a poca velocidad. Pero Einstein se dio cuenta de que era una operación incorrecta al aplicarla a objetos que se mueven a velocidades próximas a la velocidad de la luz (c = 300 000 km/s). La velocidad de la luz es un límite de la naturaleza, de modo que en ningún caso la adición de velocidades puede superar este valor. Además, la velocidad de la luz ha de ser igual para cualquier observador o sistema de referencia. Un rayo de luz

gotas están en el aire [...] las mariposas y las moscas seguirán su vuelo por igual hacia cada lado, y no sucederá que se concentren en la popa, como si se cansaran de seguir el curso del barco [...]

Este fenómeno, que en la actualidad se denomina *invarianza*, viene a demostrar que los estados de reposo y de movimiento uniforme son, en realidad, equivalentes. No son estados absolutos, como creía Aristóteles, sino relativos. Se trata de una

lanzado desde un tren en movimiento no superará en ningún caso esta velocidad, de modo que la transformación galileana no puede aplicarse en este caso. La transformación galileana hay que entenderla como aproximación correcta para velocidades pequeñas, pero se requiere de otro principio de transformación que tenga en cuenta que la velocidad de los cuerpos no supere en ningún caso la de la luz. Fue Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) el que dio con ese nuevo principio, las «transformaciones de Lorentz», y su aportación se convertiría en uno de los pilares de la teoría de la relatividad de Einstein.



cuestión de perspectiva, de puntos de vista o, como se dice en la actualidad, del sistema de referencia escogido. En el interior de un móvil sin ventanillas un observador sería incapaz de decidir si se encuentra en movimiento rectilíneo uniforme o en reposo. Por poner un ejemplo actual, una persona que se encuentre sentada en un tren en marcha estará en reposo en relación con el tren, pero en movimiento en relación con otro observador que se encuentre en una estación. Para un observador situado en el interior de un barco en movimiento, una gota que se precipite desde una botella hasta un vaso que se encuentre a sus pies caerá en línea recta, mientras que un observador externo verá que la gota traza una parábola para caer en el recipiente inferior. Con esta constatación, Galileo pudo probar que el experimento aristotélico de arrojar un objeto pesado en realidad no sirve para nada, dado que tanto el observador como la torre y la piedra pertenecen al mismo sistema de referencia.

EL MOVIMIENTO COMO RELACIÓN

La constatación realizada por Galileo según la cual los estados de reposo y absoluto son equivalentes e intercambiables significaba que tanto movimiento como reposo eran estados relativos. De esta manera se abrió paso a una concepción relacional del movimiento, enfrentada a la concepción aristotélica según la cual el movimiento es una tendencia interna. Con Galileo, el movimiento se empezó a entender como una relación entre objetos. Así lo expresaba en sus *Discursos*:

> El movimiento [...] opera en cuanto que tiene relación con cosas que carecen de él. Pero entre cosas que participan de él por igual no opera y es como si no existiese. [...] El movimiento que es común a muchos móviles es ocioso y como nulo en cuanto a la relación de estos móviles entre sí, porque entre ellos nada cambia, y únicamente es operativo en la relación que esos móviles tienen con otros que carezcan de este movimiento, con los que se da un cambio de disposición.

Donde se refiere al «movimiento común», en la actualidad hablaríamos de «compartir un mismo sistema de referencia», de modo que Galileo asegura que cuando varios objetos se encuentran en un mismo sistema de referencia que a su vez está en movimiento, dicha velocidad hay que considerarla como algo «ocioso y como nulo».

Y como corolario de la idea anterior hay que concluir que no siempre el movimiento requiere un motor y una causa, como pensaba Aristóteles. Sobre el movimiento a velocidad uniforme las causas son irrelevantes e innecesarias. Ya no es preciso recurrir a las extrañas teorías que atribuían el motor a las capas de aire: en realidad no hay nada que explicar.

LA INERCIA

Tal como se ha visto, Galileo hizo uso de una noción de inercia que le sirvió para atacar el aristotelismo y dar paso a una nueva concepción del espacio. Sin embargo, no logró desembarazarse de todas las antiguas nociones erróneas, de modo que cuando tuvo que formular el principio de inercia de forma explícita, su planteamiento era válido, pero cometió un error fundamental.

En su obra, principalmente en los *Discursos*, se encuentran algunos experimentos mentales que hoy en día siguen constituyendo una introducción muy interesante a la comprensión de dicho principio. En el primero de estos ejemplos, Galileo planteaba la siguiente situación: una bola de bronce está sobre una superficie inclinada tan pulida que su resistencia se puede obviar. Al soltar la bola, esta se deslizará acelerándose constantemente. En un segundo momento, se coloca la superficie en posición horizontal y de nuevo se deposita la bola encima. En esta situación, al dar un ligero impulso a la bola, se plantea el siguiente interrogante: «¿Qué distancia recorrerá el cuerpo en movimiento?». Como no hay resistencia ni nada que frene el objeto, la velocidad será constante. Como señala Salviati, «si ese espacio fuese indefinido, el movimiento sobre él no tendría fin, esto es, sería perpetuo».

LA INERCIA EN LOS *DISCURSOS*

Galileo se refiere al principio de inercia (sin considerarlo como principio en ningún momento) en varios pasajes de los *Discursos*, como por ejemplo en el siguiente:

Salviati: Si tuvieses una superficie de una sustancia tan dura como el acero y tan lisa y pulimentada como un espejo y que no fuese tan horizontal, sino algo inclinada, y colocases sobre ella una bola de bronce que fuera perfectamente esférica, ¿qué piensas que pasaría cuando la soltases? ¿No crees tú, como pienso yo, que se quedaría allí?

Simplicio: No puedo concebir que se quedase allí. Creo que tendría gran propensión a moverse según el declive [...] la esfera continuaría moviéndose in infinitum si el plano fuese lo suficientemente largo y acelerándose continuamente. Tal es la naturaleza de los cuerpos pesados que adquieren fuerza con la marcha y, cuanto mayor sea la inclinación, mayor será la velocidad.

Salviati: [...] Ahora dime ¿qué le podría suceder a ese mismo cuerpo sobre una superficie que no tuviese inclinación ni hacia arriba ni hacia abajo?

Simplicio: Ahora debes darme algo de tiempo para pensar mi contestación. No habiendo inclinación hacia abajo, no podría tener tendencia natural al movimiento, y no habiendo inclinación hacia arriba, no podría haber resistencia a su movimiento. De donde se deduce su indiferencia tanto para la propulsión como para el retardo. Por tanto, pienso que se quedaría naturalmente allí...

Salviati: Yo pienso lo mismo, con tal de que se hubiera dejado con cuidado, pero si se le hubiera dado un impulso hacia el lado, ¿qué sucedería?

Simplicio: Que se movería hacia ese lado.

Salviati: Pero ¿con qué clase de movimiento? ¿Continuamente acelerado, como en un plano inclinado hacia abajo, o continuamente retardado, como en un plano inclinado hacia arriba?

Simplicio: No puedo descubrir ninguna causa de aceleración o de retardo si no hay inclinación hacia abajo ni pendiente hacia arriba.

Salviati: Bien, si no hay causa de retardo, menos la habrá para detenerla; por tanto, ¿qué distancia recorrerá el cuerpo en movimiento?

Simplicio: Pues tanta como la superficie ni inclinada ni ascendente.

Salviati: Por tanto, si ese espacio fuese indefinido, el movimiento sobre él no tendría fin, esto es, sería perpetuo.

En otro experimento mental, Galileo llega a las mismas conclusiones, pero con un planteamiento aún más elegante. El experimento consiste en suponer que hay una superficie muy lisa y pulida hasta tal punto que no existe resistencia y en la que se distinguen tres partes: una inclinada, otra horizontal y otra con una inclinación igual pero opuesta a la primera.

En una primera parte del experimento (figura 3), se suelta una bola, tan pulida que tampoco ejerce resistencia, desde uno de los extremos de la superficie. Como no hay rozamiento, la bola llegará al extremo de la superficie y ascenderá por la plataforma inclinada hasta alcanzar la misma altura que desde la que se había lanzado.

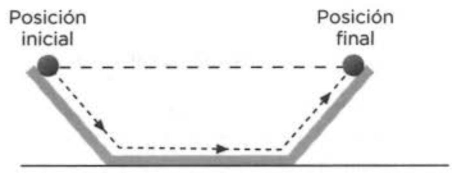


FIG. 3



FIG. 4



FIG. 5

Experimento ideado por Galileo para demostrar el principio de inercia: en caso de que no exista rozamiento, la inercia del movimiento hará que la bola prosiga moviéndose indefinidamente cuando la plataforma sea totalmente plana.

Ahora supongamos que la inclinación del lado ascendente disminuye (figura 4). Se vuelve a lanzar la bola desde el otro extremo y de nuevo llegará hasta la misma altura, pero esta vez habrá tenido que recorrer un espacio mayor. A medida que descendamos la plataforma, la bola recorrerá más espacio para alcanzar la misma altura.

¿Qué ocurrirá en el límite, cuando la plataforma forme un ángulo de 180° y sea un plano? (figura 5). En esta situación límite, la distancia que tiene que cubrir es infinita. Eso significa que la bola proseguirá su camino a velocidad constante, sin detenerse, hasta el infinito. Como afirma Galileo:

> De modo que de la mayor inclinación hacia abajo se sigue mayor velocidad y, por el contrario, sobre el plano cuesta arriba el mismo

> móvil lanzado con la misma fuerza se mueve a tanta mayor distancia cuanto menor es la elevación. Ahora decidme lo que le sucedería al mismo móvil sobre una superficie que no estuviese inclinada ni hacia arriba ni hacia abajo.

A pesar de estas sucintas explicaciones y ejemplos, Galileo llegó a la conclusión errónea de que la inercia establecía que el movimiento infinito no era rectilíneo, sino circular. Para Galileo no tenía sentido que un objeto circulara eternamente en línea recta. En un mundo esférico y finito como el que seguía concibiendo Galileo (el universo infinito imaginado por Giordano Bruno no había encontrado eco en otros pensadores de la época) no puede haber lugar para líneas rectas que se proyectan infinitamente. El movimiento inercial tenía que trazar una trayectoria circular.

Esta conclusión permite afirmar que en Galileo no existe aún una diferencia clara entre materia y espacio, es decir, no hay una geometrización del espacio —tal como ha señalado el historiador Alexandre Koyré— que sí que se encontrará posteriormente en Newton. Y, por último, también es posible que la inercia circular se aviniera con el movimiento planetario (Galileo no estuvo al corriente de los avances keplerianos sobre esta cuestión), y necesitara una razón para explicar la trayectoria de los planetas alrededor del Sol.

Sea como fuere, la inercia proporcionaría a Galileo la llave para desactivar las críticas aristotélicas respecto al movimiento de la Tierra: al formar parte del mismo sistema de referencia terrestre, no se observan efectos sobre la superficie de la Tierra, dado que el reposo que percibimos solo es «movimiento compartido». Todo aquello que participe del movimiento de la Tierra no lo percibirá como tal; dicho movimiento será invisible y sin efectos. Desde un punto de vista práctico, estar en reposo o en movimiento uniforme son equivalentes, y por esa razón los aristotélicos no pueden demostrar la inmovilidad terrestre arrojando una piedra.

Aunque esta conclusión le permitiera superar un escollo grave, su consideración de inercia rotacional le llevó a creer que no podían observarse efectos de la rotación sobre la superficie

LA INERCIA EN DESCARTES Y NEWTON

A pesar de que sus reflexiones y experimentos mentales fueron ciertamente válidos para introducir la noción de inercia, Galileo se equivocó al pensar que el movimiento resultante tenía que ser circular. El principio de inercia solo fue formulado correctamente por el filósofo René Descartes, quien sí le atribuyó un movimiento rectilíneo: «Nada en el universo va hacia el reposo, todo continúa moviéndose como esté, en línea recta y a velocidad constante, hasta que algo se interfiera». Para el científico inglés Isaac Newton, el principio de inercia tenía que ocupar un lugar de privilegio en el edificio de la física y por eso mismo le confirió el tratamiento de principio fundamental. Tal como lo formuló, este principio afirma lo siguiente: «Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta a menos que sea forzado a cambiar su estado por fuerzas externas».



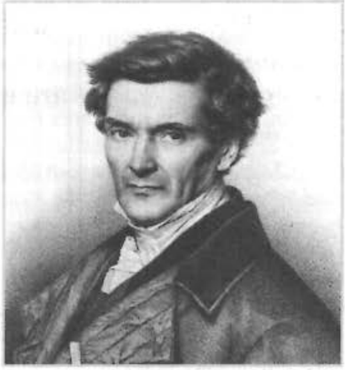
Isaac Newton en 1677, cuando era posgraduado en el Trinity College, según un grabado de Burnet Reading.

terrestre. Con una excepción: las mareas (que, como se verá en el siguiente capítulo, fue otra hipótesis errónea). También en este aspecto Galileo se equivocó, porque la rotación supone que hay una aceleración, de modo que sí que se observan efectos sobre la superficie, como es el caso del efecto Coriolis o el experimento del péndulo de Foucault.

La inercia supone equiparar velocidad y movimiento uniforme; de este modo, el movimiento que requiere explicación es el acelerado, dado que, como señaló posteriormente Newton, es el que necesita la intervención de una fuerza. A la labor de desentrañar el movimiento acelerado dedicaría Galileo parte de sus experimentos y reflexiones.

LOS EFECTOS VISIBLES DEL MOVIMIENTO TERRESTRE

El movimiento de rotación terrestre provoca que la Tierra sea un sistema de referencia no inercial, de modo que en él aparecen fuerzas ficticias que afectan a algunos fenómenos de la naturaleza. Es el caso del efecto Coriolis o del péndulo de Foucault, pruebas físicas del movimiento terrestre.



Gaspard-Gustave de Coriolis.

¿Línea recta o parábola?

El efecto Coriolis, que recibe el nombre del científico que lo describió en 1836, Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843), es un fenómeno por el que, aparentemente, una fuerza actúa sobre un cuerpo que se mueve en una superficie en rotación. Si un objeto trata de avanzar en línea recta en un sistema de referencia en rotación, otro observador dentro del mismo sistema móvil circular verá que se mueve trazando una parábola y, por tanto, deberá pensar acertadamente que actúa otra fuerza. Un observador externo, en cambio, no verá dicha parábola, sino que para él el objeto irá en línea recta. Al acercarse o alejarse del giro de la Tierra hay que tener en cuenta este efecto, como en el caso de las rutas que deben seguir los aviones que enlazan ciudades situadas a gran distancia; de lo contrario, es decir, si el avión se dirigiera en línea recta al destino señalado, acabaría desviándose sin alcanzarlo. Se trata de un efecto que solo es observable para grandes distancias (para distancias cortas es totalmente despreciable, lo que descarta que el efecto Coriolis influya en la dirección de giro del agua en un desagüe). En fenómenos atmosféricos como las tormentas o huracanes, el efecto Coriolis desvía el aire de modo que en el hemisferio norte lo hace en el sentido antihorario y en el sentido horario en el hemisferio sur.

La rotación desvía el péndulo

El físico francés Léon Foucault (1819-1868) demostró en 1851, bajo la cúpula del Panteón de París, que la rotación terrestre tiene efectos visibles. Dado que las oscilaciones de un péndulo se mantienen siempre inalteradas respecto a un observador inercial, cuando dicho péndulo y un observador se encuentran en un sistema no inercial, aparecerán fuerzas ficticias que provocarán que en el movimiento del péndulo se produzca una precesión, tal como así ocurre. Es decir, la Tierra no es un sistema de referencia inercial, así que no puede encontrarse inmóvil.

HACIA UNA NUEVA CONCEPCIÓN DEL MOVIMIENTO ACELERADO

Sobre el estudio del movimiento acelerado, Galileo se sirvió en un principio de ideas arquimedianas para cuestionar a Aristóteles. Más adelante, con el perfeccionamiento de sus experimentos, logró dar con la relación entre espacio recorrido y tiempo empleado en la caída libre.

EL PESO Y LA RESISTENCIA

En su juventud, Galileo siguió creyendo que en caída libre la velocidad de los cuerpos era constante, no acelerada. Sin embargo, se distanció de Aristóteles al considerar que dicha velocidad tenía que ser proporcional a la diferencia entre fuerza y resistencia (y no a su razón). Tanto Galileo como Aristóteles estaban equivocados, pero este razonamiento ayuda a mostrar la evolución del pensamiento de Galileo.

Este conocía el estudio arquimediano sobre los cuerpos flotantes (obra que estudió gracias a la intermediación de su maestro Ricci, quien su vez lo había aprendido de Tartaglia, traductor al italiano de la obra de Arquímedes). Según el principio hidrostático descubierto por Arquímedes, todo cuerpo sumergido en un líquido experimenta un empuje desde abajo hacia arriba igual al peso del líquido desalojado.

Las ideas de Arquímedes sobre el peso y el empuje las extendió a todos los cuerpos, no solo a los sumergidos en el agua. Según esto, el peso de un objeto podía sufrir variaciones en función de la resistencia del medio (del mismo modo que Arquímedes constató que el empuje hace variar el peso de los objetos sumergidos), de manera que hay que tener en cuenta la diferencia entre peso y resistencia (véase el anexo «La atmósfera y el rozamiento»).

El científico pisano mantuvo en un principio la concepción de Aristóteles según la cual los cuerpos caen a velocidad constante. La velocidad será entonces proporcional a la diferencia entre el peso específico del cuerpo (*P*) y la resistencia del medio (*R*, que

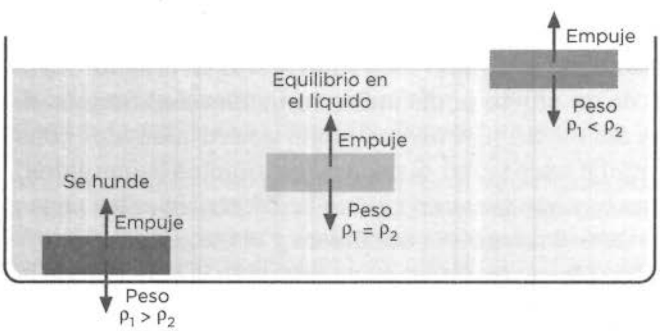
es el peso específico del aire). Expresado en notación actual sería como se muestra a continuación:

$$v = k\,(P - R),$$

donde k es una constante de proporcionalidad. En el vacío la resistencia es nula, y entonces la velocidad es proporcional a su peso específico. Por un lado, esta expresión es compatible con la existencia del vacío (noción ajena al universo aristotélico). Por

PESO ESPECÍFICO Y DENSIDAD

Gracias a Arquímedes, Galileo vinculó el peso específico de los cuerpos y su velocidad en caída libre. Arquímedes definió el peso específico de un cuerpo como el peso dividido por su volumen. Al sumergir cuerpos en un líquido, Arquímedes llegó a la conclusión de que cuando el peso específico del cuerpo sólido es igual al del líquido, entonces el cuerpo se sumerge sin hundirse hasta que su superficie no emerge del líquido. Cuando el peso específico del cuerpo es mayor que el del líquido, entonces la cantidad de líquido por él expulsada es igual al peso de todo el cuerpo sumergido. De esta manera, Arquímedes estableció que tenía que existir una fuerza, llamada empuje (*E*), que impeliera al cuerpo sólido sumergido hacia la superficie, y que sería igual a la diferencia entre el peso de la cantidad de líquido expulsada y el del cuerpo.



otro, solo en el vacío se aprecia la velocidad propia de cada objeto, sin la adulteración de la resistencia.

A pesar del innovador planteamiento, Galileo seguía creyendo que en caída libre los cuerpos no se aceleran. En el caso de que existiera aceleración, afirmaba que solo se produciría en el momento en que los cuerpos se pusieran en movimiento. Luego, la velocidad sería constante y proporcional a las diferencias de peso específico del cuerpo y del medio. Estas concepciones las modificó posteriormente.

La densidad (ρ) de un cuerpo se define como el cociente de la masa (*m*) por el volumen (*V*). Expresado algebraicamente:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

El peso específico (ϒ), a su vez, se define como la razón del peso (*P*) por el volumen (*V*):

$$\Upsilon = \frac{P}{V}.$$

Como el peso es igual a la masa por la aceleración de la gravedad, se obtiene la siguiente igualdad:

$$\Upsilon = \frac{P}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g.$$

Como se observa, el peso específico es proporcional a la densidad, y varía en función de la aceleración de la gravedad. Mientras que la densidad es un valor constante para cualquier punto del universo, el peso específico varía en función de dicha aceleración (a nivel del mar será mayor que en lo alto de una montaña, y en otros planetas más masivos dicho valor se incrementará, y lo contrario sucederá en planetas más livianos).

LA CINEMÁTICA

En su obra escrita durante su reclusión, cuando ya era un anciano, y titulada *Discursos y demostraciones matemáticas, en torno a dos nuevas ciencias relativas a la mecánica y los movimientos locales*, se encuentran recopilados los principales logros y reflexiones sobre el movimiento que Galileo alcanzó a lo largo de su vida. Fue la base que Newton posteriormente aprovechó para desarrollar las ideas que en la actualidad se denominan como física clásica. Las principales ideas que se recogen en la obra son tres: su definición de *movimiento uniforme*, de *movimiento uniformemente acelerado* y sobre la *trayectoria parabólica de los proyectiles*. Galileo distingue, por tanto, entre movimiento a velocidad constante y acelerado.

EL MOVIMIENTO UNIFORME

En la primera sección de su discurso, que es también la más breve, Galileo hizo explícita la relación entre espacio recorrido (s) y tiempo empleado (t) para definir la velocidad uniforme y rectilínea. Concluyó que el espacio recorrido es directamente proporcional al tiempo empleado y a la velocidad. Usando la notación algebraica actual, estas relaciones se expresan del siguiente modo:

$$s = v \cdot t.$$

EL MOVIMIENTO UNIFORMEMENTE ACELERADO

Tal como se ha visto en el apartado anterior, Galileo pensaba en un principio que el movimiento de caída libre era uniforme, no acelerado. Posteriormente llegó a considerar que era acelerado, pero proporcional al espacio recorrido. No se tiene constancia de que Galileo diera con la solución correcta, esto es, que la aceleración es proporcional al cuadrado del tiempo, hasta 1604. En una





114 DIALOGO SECONDO

ſin quì dichiarate, non ſarà difficile l'intender la ragione, onde auuenga, che vn Priſma, ò Cilindro ſolido di vetro, acciaio, legno, ò altra materia frangibile, che ſoſpeſo per lungo ſoſterrà grauiſſimo peſo, che gli ſia attaccato, mà in trauerſo (come poco fà diceuamo) da minor peſo aſſai potrà tal volta eſſere ſpezzato, ſecondo che la ſua lunghezza eccederà la ſua groſſezza. Imperò che figuriamoci il Priſma ſolido A B, C D fitto in vn muro dalla parte A B, e nell' altra eſtremità s'intenda la forza del Peſo E, (intendendo ſempre il muro eſſer eretto all' Orizonte, & il Priſma, ò Cilindro fitto nel muro ad angoli retti) è manifeſto che douendoſi ſpezzare ſi romperà nel luogo B, doue il taglio del muro ſerue per ſoſtegno, e la B C per la parte della Leua, doue ſi pone la forza, e la groſſezza del ſolido B A è l'altra parte della Leua, nella quale è poſta la reſiſtenza, che conſiſte nello ſtaccamento, che s' hà da fare della parte del ſolido B D, che è fuor del muro, da quella che è dentro; e per le coſe dichiarate il momento della forza poſta in C al momento della reſiſtenza che ſtà

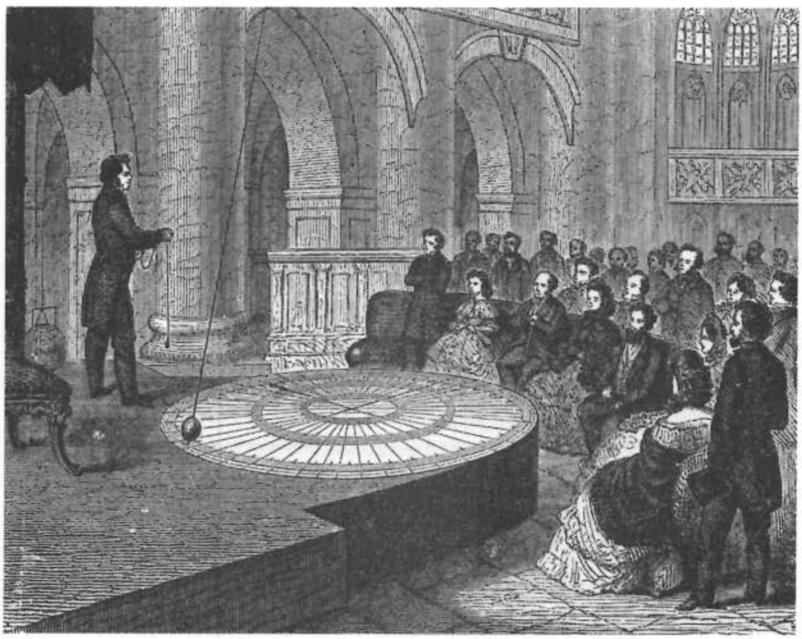


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Momento en el que el astronauta David R. Scott deja caer un martillo y una pluma en la superficie lunar, comprobando que ambos caen al mismo tiempo.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Página de *Discursos y demostraciones matemáticas,* obra en la que Galileo recoge sus reflexiones sobre el movimiento.

FOTO INFERIOR:
Foucault demuestra con su péndulo la rotación de la Tierra en la Institución Politécnica de Londres.

carta escrita a su amigo Sarpi, datada en el citado año, afirma lo siguiente:

> Repensando acerca de las cuestiones del movimiento, [...] demuestro luego el resto, esto es, que los espacios recorridos por el movimiento natural están en proporción doble de los tiempos [...].

Galileo crea ya aquí una correlación entre el espacio recorrido y el cuadrado del tiempo.

En el segundo libro que constituye los *Discursos*, establece de nuevo correctamente que la velocidad se incrementa en proporción al tiempo en el caso de movimientos de caída naturales. Lo enuncia de este modo:

> Llamo movimiento igualmente o uniformemente acelerado a aquel que, a partir del reposo, va adquiriendo incrementos iguales de velocidad durante intervalos iguales de tiempo.

Si expresamos esta formulación con la notación actual, donde v representa la velocidad, a la aceleración y t el tiempo, tenemos lo siguiente:

$$v = a \cdot t.$$

En el caso de que la velocidad inicial fuera distinta de cero, habría que añadir una nueva variable, v_0, a la expresión anterior.

Galileo prescinde en todo momento de la resistencia del medio para llegar a establecer esta relación. También explica algunos de los razonamientos que le condujeron a esta conclusión (lo que demostraría que, además de los experimentos, Galileo se apoyaba en finas reflexiones):

> Cuando yo observo que una piedra al descender de una altura, partiendo del reposo, adquiere continuamente nuevos incrementos de velocidad, ¿por qué no he de creer que tales aditamentos se efectúan según el modo más simple y obvio para todos? Porque, si observamos con atención, ningún aditamento, ningún incremento hallaremos más simple que aquel que se sobreañade siempre del mismo modo.

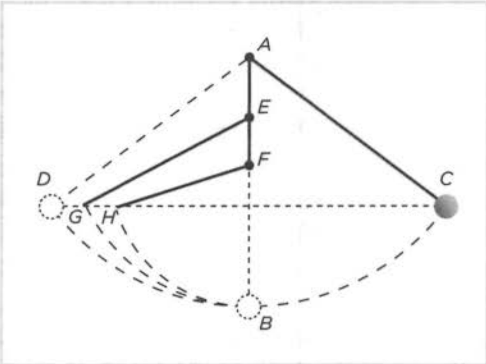
La caída libre fue uno de los retos científicos más importantes a los que se enfrentó Galileo. La dificultad era enorme: para estudiar de forma adecuada este tipo de movimientos es necesario recurrir a una tecnología, como la fotografía instantánea, que no existía en su época. Los objetos caen demasiado deprisa y se necesitan instrumentos de precisión para estudiarlos adecuadamente. Galileo superó esta dificultad de forma sumamente elegante: estudió este movimiento recurriendo a planos inclinados, lo que era una forma de «diluir la gravedad» y lograr un experimento equivalente que sí podía estudiar. Un plano cuya inclinación sea cada vez mayor, en el límite tendrá una dirección vertical.

Como ya se explicó en el capítulo 1, Galileo hizo uso de un método de medición de tiempo basado en un reloj de agua. Marcó la posición de la esfera en el plano inclinado a intervalos iguales de tiempo. A partir de estas marcas, Galileo se dio cuenta de que las distancias recorridas durante los intervalos de tiempo guardaban una proporción de números impares: 1:3:5:7. Dado que las proporciones se mantenían con planos más inclinados, este mismo efecto tenía que producirse en la caída libre.

El tiempo que tarda en recorrer cada tramo de espacio es 1, 3, 5, 7..., lo que significa que para recorrer el primer tramo se tarda una unidad de tiempo; al finalizar el segundo tramo se ha tardado un total de $1+3=4$ unidades de tiempo. Sin embargo, los tramos de espacio recorrido son cada vez mayores, a cada unidad de tiempo le corresponde 1, 4, 9, 16... unidades de espacio. Veamos el resto en la siguiente tabla:

Instante de tiempo (t)	Intervalo de tiempo (Δt)	Intervalo de tiempo² (Δt^2)	Espacio (Δs)
1	1	1	1
3	2	4	4
5	3	9	9
7	4	16	16

LAS DEMOSTRACIONES



Aunque un clavo se coloque en las posiciones *E* o *F*, interfiriendo el movimiento del péndulo, este alcanzará siempre la misma altura.

Además de la influencia de Arquímedes, la de Euclides es también perceptible en la obra de Galileo. Se observa, por ejemplo, en su pretensión de establecer conclusiones o postulados a partir de otros postulados o principios. Recurría también con frecuencia, al igual que Euclides, a argumentos geométricos y visuales. Algunas de estas demostraciones aluden también a experimentos; por ejemplo, el siguiente postulado: «Acepto que las velocidades de un mismo móvil adquiridas sobre diversos planos inclinados son iguales, cuando las alturas de esos mismos planos son iguales». En la demostración, Galileo propuso servirse de un péndulo, que se haría oscilar levantándolo un cierto ángulo. Al soltarlo describiría un arco que pasaría por el punto de equilibrio hasta alcanzar la misma altura. Si se colocara un clavo a distintas distancias del punto *A* en el que el péndulo está sujeto (en los puntos *E* y *F*) y se repitiera la experiencia de soltarlo desde esos puntos, entonces igualmente en todos los casos se alcanzaría la misma altura.

Al comparar la segunda columna con la última, se observa la equivalencia entre espacio y cuadrado del tiempo. De la expresión anterior se deduce que la distancia recorrida (s) es siempre proporcional al cuadrado del tiempo empleado. Es decir,

$$s \propto t^2.$$

En la actualidad (véase el anexo «Masa y gravedad»), esta relación entre el espacio y el cuadrado del tiempo lo expresamos con la siguiente fórmula:

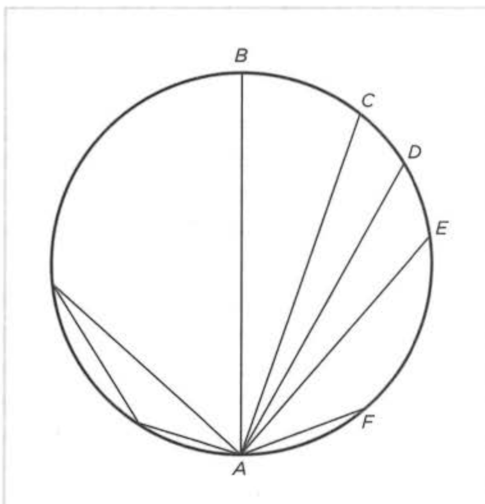
$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2.$$

Para el caso de un cuerpo cayendo libremente, el valor de la aceleración (a) es de 9,81 m/s². Galileo expresó estas ideas del siguiente modo:

> Si un móvil con movimiento uniformemente acelerado desciende desde el reposo, los espacios recorridos por él en tiempos cualesquiera están entre sí como la razón al cuadrado de los mismos tiempos, es decir, como el cuadrado de esos tiempos.

Una de las consecuencias que se seguía del descubrimiento anterior es el siguiente postulado, que Galileo ya había puesto por escrito en un manuscrito años antes:

> Sea *BA* el diámetro del círculo *BDA* levantado desde la horizontal, y sean trazadas líneas *utcunque AF*, *AE*, *AD*, *AC* desde el punto *A* hasta la circunferencia: demuestro que móviles iguales caen en tiempos iguales por la perpendicular *BA* y por planos inclinados según las líneas *CA*, *DA*, *EA*, *FA*; de modo que, partiendo en el mismo momento de los puntos *B*, *C*, *D*, *E*, *F* llegarán en el mismo momento al punto *A*, siendo la línea *FA* tan pequeña como se quiera.



Un móvil que se desplace por cualquiera de los planos inclinados que finalizan en el punto *A* tardará siempre el mismo tiempo en llegar al destino.

PROYECTILES Y PARÁBOLAS

Otro de los problemas centrales de los matemáticos de la época era la trayectoria de los proyectiles. Tales matemáticos, como Tartaglia, recurrían a la teoría del *ímpetus*, esto es, una fuerza que se puede conferir a los cuerpos y que se va consumiendo por el roza-

EL *ÍMPETUS* Y LA CAÍDA DE LOS CUERPOS

Según una teoría planteada por el filósofo francés Jean Buridan (ca. 1300-1358), los objetos no se mueven a causa del medio (como pensaba Aristóteles), sino que el origen hay que buscarlo en una fuerza capaz de imprimirse en el objeto llamada *ímpetus*. Se trata, por otro lado, de una idea muy intuitiva. Giambattista Benedetti (1530-1590) era un físico de la Universidad de Padua que defendía la teoría del *ímpetus*. Este profesor planteó el siguiente experimento mental: se tira una piedra en el interior de un pozo que atraviesa toda la Tierra hasta alcanzar su centro. Según Aristóteles, la piedra, al llegar al centro del planeta, se detendrá porque habrá llegado al lugar natural. Benedetti, por el contrario, consideraba que la piedra oscilaría alrededor del centro hasta que el *ímpetus* se agotara y finalmente el objeto se detendría.

miento con el medio. Partiendo de ella dividían el movimiento de un proyectil en tres partes: en primer lugar llevaría un movimiento rectilíneo, caracterizado por la fuerza que se imprimiría al objeto; cuando la fuerza ya se fuera acabando, se equilibraría el *ímpetus* con la gravedad, dando lugar a una trayectoria semicircular; por último, el proyectil caería verticalmente en la tercera parte del movimiento.

La aproximación de Galileo fue sumamente ingeniosa y superó las concepciones del *ímpetus*. Pensó el siguiente experimento: se toma una esfera que se mueve por una superficie plana a velocidad uniforme. Al alcanzar el borde de la superficie, a partir de ese momento su movimiento tendría que tener dos componentes claramente distinguibles. Por un lado, la componente horizontal, que seguiría siendo un movimiento uniforme, de modo que recorrería espacios iguales en tiempos iguales (lo que se seguiría al aplicar el principio de inercia: sería un movimiento con una resistencia despreciable). Por otro, la componente vertical, cuyo movimiento sería uniformemente acelerado, de modo que las distancias serían proporcionales a los cuadrados del tiempo, tal como ya había descubierto. La combinación de ambos movimientos da lugar a una trayectoria parabólica.

En la actualidad, para determinar la posición de un punto (x, y) en la trayectoria de un proyectil lanzado horizontalmente, se usan las siguientes igualdades:

$$x = v_x \cdot t$$

$$y = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

donde v_x es la componente horizontal de la velocidad, que es constante, y g representa la aceleración de la gravedad al nivel del mar, que es igual a 9,81 m/s^2. Es decir, es movimiento que se puede descomponer en dos y tratar ambos de forma independiente y complementaria.

CAPÍTULO 4

Galileo y la Inquisición

Galileo tuvo que enfrentarse a la Inquisición en dos ocasiones: en la primera fue amonestado, mientras que en la segunda recibió una condena a perpetuidad. Se le acusó de copernicano, aunque en el fondo se censuraba su naturalismo: mientras que la Iglesia aceptaba el copernicanismo siempre que fuera tratado como mera hipótesis, Galileo fue más allá al considerarlo una cosmovisión verdadera.

Por la ciencia, Galileo acabó enfrentándose a la Iglesia y fue juzgado finalmente por la Inquisición. Cuando en la actualidad se evoca al conflicto entre ciencia y fe, uno de los capítulos principales lo ocupa Galileo y la Inquisición. Galileo chocó con ella en dos ocasiones. En un primer momento solo fue amonestado y advertido; posteriormente fue condenado. Su principal crimen fue cuestionar que la teología pudiera describir el mundo: ese era el espacio de la ciencia, y era la principal reivindicación de Galileo. Otro de los crímenes que la Iglesia no le perdonó fue que defendiera una concepción realista del copernicanismo. Es decir, Galileo no solo estaba convencido de la superioridad instrumental de la concepción heliocéntrica, sino que además argumentaba que si servía mejor a los cálculos era porque se trataba de una descripción real de los hechos.

Para Galileo, el geocentrismo y el heliocentrismo eran concepciones rivales, y los hechos debían ser los únicos jueces que intervinieran para hacer decantar la balanza. La Iglesia, por el contrario, basaba sus certezas en el libro sagrado, no en el libro de la naturaleza. Como trasfondo a este debate, Galileo estaba poniendo en entredicho que la Biblia pudiera seguir tomándose como una referencia para describir el mundo. Sin cuestionar la verdad revelada, Galileo tenía muy claro que había llegado el momento de dar por concluido el monopolio teológico de la descripción del mundo.

EL NATURALISMO Y LA BIBLIA

Los teólogos se consideraban legitimados para describir la realidad, y para ello empleaban como fuente de conocimiento la Biblia, un texto que en la época nadie, ni el propio Galileo, dudaba que contenía la verdad revelada por la divinidad. En la Biblia existen algunos pasajes en los que se da a entender que la Tierra se encuentra inmóvil. Por ejemplo en Josué (capítulo 10):

> Entonces habló Josué a los ojos de Israel y dijo: «Detente, Sol, en Gabaón, y tú, Luna, en el valle de Ayyalón». Y el Sol se detuvo y la Luna se paró hasta que el pueblo se vengó de sus enemigos. El Sol se paró en medio del cielo y no tuvo prisa en ponerse como un día entero. No hubo día semejante ni antes ni después, en que obedeciera Yahveh a la voz de un hombre.

En los Salmos también se pueden leer fragmentos en los que se reafirma la concepción geocéntrica, como cuando se afirma: «Pusiste la Tierra sobre sus bases para que ya nunca se mueva de su lugar» (Sal 104, 5).

La Biblia parecía apostar claramente por el geocentrismo, de modo que ofrecía una cosmovisión que encajaba como anillo al dedo con las concepciones de Aristóteles y Ptolomeo. La Iglesia aceptó, tal como habían hecho los astrónomos, que se pudiera trabajar con hipótesis alternativas, pero siempre que se consideraran como meros instrumentos de cálculo y sin ninguna base real. De este modo se asumía como propia la posición de Osiander, el editor de la obra de Copérnico, que en el prólogo —un texto que por otro lado Copérnico no había aprobado— afirmó que la teoría de Copérnico había que entenderla como hipótesis matemática para ayudar a realizar los cálculos.

Este punto de vista lo defendió también el cardenal Belarmino (1542-1621), que era el presidente del Colegio de Roma y quien en una carta defendió que se pudiera «hablar *ex suppositione* en vez de absolutamente» sobre el copernicanismo. Es decir, se trataba de una hipótesis que podía ser una excelente herramienta de trabajo, pero que era inaceptable confundirla con la realidad, que necesa-

riamente era geocéntrica. Era una posición ingeniosa, ya que seguía manteniendo la vigencia de la Biblia como verdad literal e irrefutable, y al mismo tiempo se permitía que hubiera investigaciones astronómicas que plantearan otros modelos del mundo que ofrecieran mejores resultados, con el único requisito de que no se identificaran con la realidad. Era una forma de aprovecharse de las mejores teorías y al mismo tiempo mantener vigente el modelo del mundo que se había asumido como verdadero.

LA TESIS DE LA COMPLEMENTARIEDAD

Para Galileo no tenía ningún sentido pensar que la teoría que mejor se adecuara a los hechos era la que tenía que considerarse como falsa. En estos términos defendió su posición realista respecto al copernicanismo, no solo como mera hipótesis:

> Hay que reparar en el hecho de que cuando tratamos del movimiento o de la inmovilidad de la Tierra o del Sol, nos hallamos frente a un dilema de proposiciones contradictorias, una de las cuales ha de ser necesariamente verdadera, de manera que no cabe en modo alguno decir que acaso no sea de una forma ni de la otra. Ahora bien, si la inmovilidad de la Tierra y el movimiento del Sol se dan realmente en la naturaleza, resultando absurda la posición contraria, ¿cómo podrá sostenerse razonablemente que la hipótesis falsa se adecua mejor que la verdadera a las apariencias observadas en los movimientos y las posiciones de los astros? [...] Dado que una de ellas ha de ser necesariamente falsa y la otra verdadera, mantener que sea la falsa la que mejor se adecua a los efectos de la naturaleza es algo que realmente desborda mi imaginación.

Galileo no pretendía, sin embargo, afirmar que la Biblia fuera falsa, y tampoco consideraba que pudieran coexistir dos verdades opuestas, una referida a la ciencia y otra a la fe. Al contrario, pensaba que tenían que decir lo mismo, de modo que si se había producido una contradicción aparente, tenía que deberse a que se había interpretado la Biblia de forma errónea. Es el constante re-

curso a metáforas y su lenguaje figurado el que facilitaba que se cometieran tales errores de interpretación. Por ejemplo, en el caso del texto de Josué, en realidad no se dice nada sobre el movimiento de la Tierra: es una conclusión que se ha derivado del texto, pero que no se afirma explícitamente.

«La Biblia enseña cómo llegar al cielo, no cómo funcionan los cielos.»

— Galileo Galilei.

Por otro lado, Galileo puso en duda el papel que los teólogos habían ejercido hasta ese momento. Ciencia y teología tenían que funcionar de forma independiente, ya que se ocupan de dominios muy distintos. La ciencia versa sobre los hechos, su dominio abarca todos los fenómenos naturales. La teología se ocupa de la fe y su dominio son los fenómenos sobrenaturales. Cuando la teología pretende explicar cómo funciona el mundo obra de forma ilegítima, de la misma manera que sería ilegítimo que la ciencia dictaminara sobre cuestiones de fe.

LA FALSEDAD DEL GEOCENTRISMO

Al adherirse a una cosmovisión determinada, la Iglesia se expuso a ser refutada y quedar en evidencia, como así ocurrió. Y cuando Galileo se atrevió a mostrar las debilidades de sus argumentos, el estamento eclesiástico se aprovechó de su poder para humillar a los que se atrevían a cuestionar sus dogmas. Su tolerancia respecto a cosmovisiones rivales solo alcanzaba a que estas fueran consideradas como instrumento matemático, no como una realidad.

Gracias a las observaciones astronómicas, Galileo había acumulado suficientes pruebas contra las concepciones aristotélicas para desmontar la tesis de la inmutabilidad, incorruptibilidad y perfección de los cielos, entre las que cabía citar las montañas en la Luna, las manchas del Sol o las supernovas. La supuesta división entre mundo sublunar y mundo supralunar era una invención.

Con sus observaciones también pudo poner en jaque el geocentrismo, entre las que destaca el descubrimiento de las fases de Venus. Desde la concepción ptolemaica se podían predecir fases crecientes para Venus, pero no decrecientes. Las observaciones, por el contrario, mostraban un planeta con fases crecientes y decrecientes, al igual que la Luna. Y las fases solo podían explicarse si Venus girara alrededor del Sol. Se trató posiblemente de la primera observación que probaba que el geocentrismo tenía que ser necesariamente erróneo, de modo que en 1611, cuando Galileo descubrió dichas fases, ya contaba con una prueba definitiva.

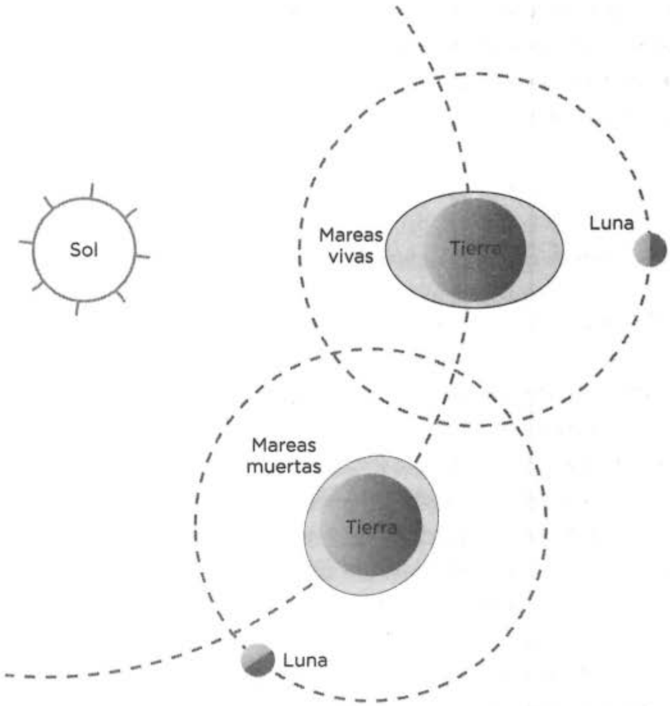
Las fases de Venus invalidaban el geocentrismo, pero no conducían necesariamente hacia el heliocentrismo. La teoría de Tycho Brahe, según la cual el universo estaba contenido en una esfera de estrellas fijas, con la Tierra ocupando su centro, y el Sol y la Luna girando a su alrededor, mientras que el resto de los planetas giraban en torno al Sol, seguía siendo compatible con las observaciones. Era necesario probar que la Tierra estaba en movimiento, y Galileo pudo contar con una prueba indirecta gracias al descubrimiento de los satélites de Júpiter. Para determinar la posición de los satélites, era necesario introducir una corrección debida al movimiento de la Tierra. Con esta premisa, Galileo fue capaz de predecir los eclipses de los satélites en 1612, mientras que otros astrónomos que divisaron tales satélites fueron incapaces de realizar dicha predicción correctamente.

EL ARGUMENTO DE LAS MAREAS

Galileo requería, además, una prueba directa del movimiento terrestre, y creyó encontrarla en las mareas. Cuando llevamos un vaso lleno de agua de un sitio para otro, se puede comprobar que el contenido se mueve. Galileo pensó que si la Tierra estaba en movimiento, esto tenía que traducirse también en un movimiento de las aguas oceánicas. Las mareas parecían un fenómeno que encajaba con las expectativas. En realidad las mareas son consecuencia del efecto gravitatorio que el Sol y la Luna ejercen sobre el agua de los océanos, y no del movimiento terrestre.

LAS MAREAS

Las mareas son un cambio de nivel del mar. La marea alta o pleamar tiene lugar cuando el nivel del mar alcanza su punto máximo; la marea baja se refiere a la situación opuesta. Normalmente hay dos mareas altas y otras dos bajas a lo largo del día, y entre la alta y la baja puede llegar a haber una diferencia de unos tres metros. En la actualidad se sabe que las mareas no son un efecto del movimiento terrestre, sino un fenómeno gravitatorio, en el que participan principalmente la Luna y el Sol. La gravedad de ambos astros tira del agua oceánica de modo que esta adquiere una forma elipsoidal. En función de la alineación entre los tres astros se produce un tipo diferente de marea. Cuando la Luna y el Sol se alinean (tal como se puede ver en la parte superior de la figura), la marea que se origina es máxima y se conoce como *marea viva*; cuando los astros se encuentran en sentido perpendicular, entonces los elipsoides se anulan entre sí, dando lugar a una marea mínima, llamada *marea muerta*.



Su razonamiento sobre las mareas es una prueba de que Galileo no consideraba el copernicanismo como mero instrumento, sino como una teoría real que tenía efectos en la vida cotidiana. Era una teoría que, sin embargo, contradecía una de las principales aportaciones físicas de Galileo: el principio de inercia, según el cual en la superficie terrestre ningún observador apreciaría ningún efecto del movimiento de la Tierra.

Para Galileo, el movimiento de la Tierra y la concepción heliocéntrica eran evidencias que se sostenían en pruebas firmes. A pesar de ello, en muy raras ocasiones se atrevió a expresar esta convicción. De forma explícita se encuentra, por ejemplo, en sus cartas sobre las manchas solares, donde al hacer referencia a Venus afirmó:

> Os aseguro que este planeta, no menos que la astada Venus, concuerda admirablemente con el gran sistema copernicano, cuyos vientos propicios se ven ahora soplar universalmente para guiarnos con tal brillo que apenas queda lugar para que la razón tema las sombras o los vientos cruzados.

LA AMONESTACIÓN

Galileo fue ante todo una persona prudente. Conocía los peligros y el destino que había deparado a Bruno, en 1600, su defensa del copernicanismo. Se trataba de un claro aviso sobre los límites que no tenía que traspasar si no quería poner su vida en peligro.

Cuando, en 1611, Galileo abandonó Padua para dirigirse de nuevo a Florencia había alcanzado la cima de su carrera. Había sido nombrado filósofo y matemático de la corte del gran duque de Toscana Cosme II con unos privilegios impensables para la época. Tal como escribió al secretario del gran duque:

> Por muy espléndida y generosa que sea una República [en referencia a la República de Venecia], es imposible obtener de ella un patrocinio sin que ello conlleve unos deberes; así, pues, para obtener algo del

público uno debe trabajar para el público y, en tanto que soy capaz de dar clases y escribir, la República no me puede eximir de los deberes mientras disfruto de los emolumentos. En resumen, no albergo ninguna esperanza de disfrutar de esta comodidad y tiempo libre en la medida en que los necesito si no es al servicio de un príncipe absoluto.

El gran duque de Toscana pudo ofrecer los anhelados privilegios a los que aspiraba el científico. Su oferta era irrechazable y muy superior a lo que se le ofrecía en Venecia. Se le concedió una pensión de mil florines y, además, quedó liberado de impartir clases en la universidad. Tuvo, por tanto, lo que siempre había ansiado: plena libertad para trabajar y todos los medios económicos a su disposición. En Florencia, además, encontró nuevos compañeros de diversión y discusiones científicas y filosóficas, entre los que destacaba principalmente el aristócrata Filippo Salviati, en cuya villa permanecería largos períodos de tiempo escribiendo. En una carta escrita en 1610, Galileo enuncia los proyectos que tiene por delante:

> Las obras que tengo pendientes son principalmente dos libros *Sobre el sistema y constitución del universo*, tema inmenso, lleno de filosofía, astronomía y geometría; tres libros *De motu locali (Sobre el movimiento local)*, ciencia enteramente nueva, [...] tres libros de mecánica [...].

Al llegar a Florencia, Galileo tenía muy claro cuáles eran sus objetivos y por fin tenía los medios para conseguirlos. Aunque todo apuntaba a que gozaría de una época de esplendor científico, esta se vio oscurecida por sus problemas de salud y por el enfrentamiento con la Iglesia.

VIAJE A ROMA

En 1611 Galileo decidió realizar su primer viaje a Roma. Se trató de un viaje triunfal: su obra *Sidereus nuncius* le precedía en su

FILIPPO SALVIATI

Salviati (1582-1614) era un joven florentino perteneciente a la nobleza. De frágil salud, recibió clases particulares de Galileo sobre matemáticas y astronomía durante un breve período en 1610. Alegre y jovial, pronto congeniaron. Salviati era una persona muy capacitada para las ciencias, y Galileo decidió invitarlo a que formara parte de la Academia de los Linces *(Accademia dei Lincei)*. Salviati residía en la villa de la Selva, en las colinas de Signa, un lugar tranquilo y apartado donde invitó con frecuencia a Galileo, y este encontró la tranquilidad necesaria para redactar algunos de sus escritos, como el referido a las manchas solares. La Selva fue un lugar de trabajo, conversaciones y también fiestas. Desafortunadamente, Salviati moriría en 1614, en un viaje a Barcelona cuando tenía solo treinta y dos años. Galileo lo inmortalizaría posteriormente como uno de sus interlocutores en los *Diálogos*.



fama, y fue incluso recibido por el papa Pablo V con todos los honores. Galileo además se llevó consigo telescopios para convencer con los hechos a los escépticos. Uno de ellos era el matemático Clavius, a quien había visitado veintidós años atrás, cuando un joven Galileo estaba necesitado de un puesto universitario. Clavius, que moriría al año siguiente, había sido muy crítico con los descubrimientos descritos por Galileo, pero acabó concediendo que el telescopio ofrecía evidencias de las que no se podía dudar. Galileo también contactó con el aristócrata Federico Cesi (1585-1630), fundador de la sociedad científica Academia de los Linces *(Accademia dei Lincei)*, cuya finalidad era la de buscar el

auténtico conocimiento. Galileo fue invitado a formar parte de la Academia, y pasó a ser uno de sus miembros de honor.

«Todo el sistema de los cielos se ha roto y ahora hace falta enmendarlo.»

— Christopher Clavius.

Cesi se convirtió además en uno de los principales defensores de Galileo en Roma. Los iba a necesitar, dado que en aquella época la Inquisición empezó a estudiar sus afirmaciones con más detenimiento. El cardenal Belarmino, que había firmado la condena a muerte de Bruno, creyó que era necesario investigarlo. Precisamente durante esa época el académico aristotélico Ludovico delle Colombe se atrevió a arremeter contra Galileo en su *Discurso contra el movimiento de la Tierra*, donde, por ejemplo, afirmaba que los valles que Galileo había visto en la Luna en realidad estaban recubiertos de un material invisible, de modo que el astro en realidad sí que era perfectamente esférico. Para Colombe, Galileo había hecho afirmaciones incompatibles con la Biblia, como lo probaba el texto de Josué.

LUDOVICO DELLE COLOMBE

Colombe (1565-1616) fue un aristotélico que dedicó todos sus esfuerzos a cuestionar cualquier descubrimiento incompatible con las teorías de Aristóteles. Además de rechazar con todo tipo de argumentos los descubrimientos celestes, también criticaba, por ejemplo, la teoría hidrostática de Arquímedes. Para Colombe, lo que determinaba que los cuerpos flotaran o no en un medio acuático era su forma, no su densidad. Llegó a retar a Galileo a un concurso público para demostrar quién tenía razón. Aunque Galileo aceptó, finalmente el gran duque le avisó que no era conveniente que una persona con el cargo que ostentaba se rebajara a esta clase de juegos (y sería inaceptable por otro lado que saliera derrotado de la contienda). Finalmente Galileo rechazó el reto, pero optó por escribir un breve tratado sobre hidrostática.

En ese pasaje se sobreentiende que el Sol está en movimiento y, por tanto, implícitamente se asume que la Tierra está necesariamente en reposo. No era la primera vez que Colombe hacía una defensa del aristotelismo. Como estaba convencido de la inmutabilidad de los cielos, afirmó que la supernova de 1604 era en realidad una estrella que siempre había estado allí, aunque había pasado desapercibida.

LA PRUEBA DEFINITIVA CONTRA EL ARISTOTELISMO: LAS MANCHAS SOLARES

En su regreso a Florencia, Galileo dedicó su tiempo a realizar infinidad de observaciones, tanto del Sol como de Saturno. Observaba el Sol al atardecer y con nubes (si hubiera procedido de otra manera hubiera perdido la visión). Posteriormente, gracias a la intervención de su discípulo Benedetto Castelli (1578-1643), introduciría el método de la proyección.

Galileo se percató de que las manchas solares significaban una nueva prueba en contra de Aristóteles. Así describía el propio científico esta constatación:

> Sospecho que este nuevo descubrimiento será la señal del funeral o al menos del Juicio Final de la pseudofilosofía. El canto lúgubre por ella ya se ha oído en la Luna, las Estrellas Mediceas, Saturno y Venus. Ahora espero ver cómo los peripatéticos [los seguidores de Aristóteles] aplican todos sus esfuerzos para sostener la inmutabilidad de los cielos.

Tal como había pronosticado, las manchas supusieron un nuevo frente abierto con los aristotélicos. El jesuita alemán Christoph Scheiner, que firmaba sus escritos con el pseudónimo de *Apelles*, afirmó por ejemplo que tales supuestas manchas en realidad eran planetas que se interponían con el Sol. La polémica con Scheiner fue muy agria. Lo único que consiguió el científico pisano fue granjearse un número aún mayor de enemigos.

Otro evento más que reflejaba el lento caldo de cultivo que se estaba gestando contra Galileo ocurrió en 1614, cuando el sacer-

dote dominico Tommasso Caccini (1574-1648), en un sermón de su congregación, acusó a Galileo de hereje por defender el heliocentrismo. De nuevo, la referencia bíblica de Josué salió a la palestra. Los dedos acusadores se empezaban a esgrimir sin pudor, señalando al mayor científico de la época.

CARTA A CRISTINA DE LORENA

Entre los historiadores, se considera que la pretensión de Galileo de querer delimitar el papel que tenía que tener la teología en relación con la ciencia, que expuso en una serie de cartas a Cristina de Lorena, la madre de Cosme II de Médicis, pesaron enormemente en su posterior amonestación. Cristina era una mujer culta a quien le gustaba rodearse de humanistas y pensadores para debatir sobre toda clase de cuestiones. En una de estas discusiones participó el discípulo de Galileo, Benedetto Castelli, que en ese momento tenía una plaza de profesor de Matemáticas en Pisa. En la discusión se tocó el tema del copernicanismo, y se planteó la posibilidad de si esta doctrina era contraria a las escrituras. Castelli defendió la independencia de la ciencia respecto de la teología. Posteriormente le comentó a Galileo el incidente, y este le respondió epistolarmente, en las *Cartas a Castelli*, en 1613, donde exponía claramente su posición. Dos años más tarde ampliaría el texto con la *Carta a Cristina de Lorena* (de la que circularon numerosas copias, pero solo se publicó en 1636).

La carta tuvo el efecto de enfurecer a numerosos teólogos. Defendía la independencia de la ciencia respecto a la teología. Galileo no dudaba de la verdad de la Biblia, pero consideraba que era un texto que era necesario interpretar. Y además, era necesario que tales interpretaciones se amoldaran a las verdades y hechos descubiertos por la ciencia. La lectura interpretativa tenía que adaptarse al conocimiento firme y seguro que proporcionaba la inspección científica de la realidad.

El propósito de Galileo era conciliar ambas disciplinas, indicando que sus temas de estudio eran dispares y complementarios, pero con esa pretensión solo logró despertar la ira de los teólogos.

Finalmente, el padre Niccolò Lorini (1544-1617), también dominico, acusó a Galileo de hereje en 1615. Se le acusaba de contradecir las Escrituras, y atreverse a insinuar, como lo hacía en las cartas a Cristina de Lorena, que el texto sagrado era interpretable.

Tuvo también sus defensores, como el carmelita Paolo Antonio Foscarini (1565-1616), quien escribió un libro en el que se alegaba que el copernicanismo no entraba en contradicción con la Biblia. Sin embargo, este apoyo se acabó convirtiendo en una losa, ya que el libro fue considerado herético. En una carta a Foscarini, Belarmino expuso la condena por las siguientes razones:

> Primero. Me parece que Vuestra Paternidad y el Señor Galileo actuarían prudentemente limitándose a hablar *ex suppositione* en vez de absolutamente, como he pensado siempre que habló Copérnico. Pues decía que, suponiendo que la Tierra se mueve y el Sol está quieto se salvan todas las apariencias mejor que con los excéntricos y epiciclos, se puede perfectamente, y no tiene ningún peligro, y eso es suficiente para el matemático. Pero querer afirmar que realmente el Sol está en el centro del mundo, y solo gira sobre sí mismo sin moverse de oriente a occidente, resulta muy peligroso, no solo por irritar a todos los filósofos y teólogos escolásticos, sino también porque puede dañar a la santa fe, haciendo falsas las Escrituras...

Belarmino, por otro lado, mostró una cara más razonable cuando añadió las siguientes palabras:

> Si se diese una verdadera demostración de que [...] la Tierra gira alrededor del Sol, entonces habría que explicar con mucha circunspección las Escrituras que parecen contrarias, y más bien decir que no las entendemos, antes que decir que sea falso lo que se ha demostrado. Pero no creeré que exista tal demostración hasta que no me sea mostrada [...] y en caso de duda no se debe abandonar la Escritura.

A principios de 1616, once consultores-teólogos del Vaticano se reunieron para decidir sobre si el copernicanismo tenía que conside-

rarse una doctrina herética o, por el contrario, no contradecía ningún dogma de la Iglesia. Finalmente se llegó a la conclusión de que la afirmación de que la Tierra estaba en movimiento era efectivamente herética al contradecir algunos pasajes bíblicos. Según el dictamen publicado, la concepción heliocéntrica pasó a considerarse:

> Necia y absurda desde el punto de vista filosófico, y además formalmente herética, ya que contradice expresamente muchas de las afirmaciones de las Sagradas Escrituras, tanto en su significado literal como en el significado que les atribuyen los Santos Padres y los doctores en teología.

Y sobre el movimiento terrestre, tanto de rotación como de traslación, también «merece idéntica censura que la anterior desde el punto de vista filosófico, mientras que desde el punto de vista teológico es errónea en lo que se refiere a la fe».

El papa ordenó al cardenal Belarmino que prohibiera a Galileo explicar el copernicanismo. El 26 de febrero de 1616 se reunió con Galileo para exponerle la postura de la Iglesia y que desobedecer su mandato le supondría la condena en prisión. Galileo aceptó, sufriendo únicamente una amonestación verbal.

La condena del Vaticano del copernicanismo se hizo pública el 5 de marzo, sin que hubiera ninguna referencia explícita a Galileo. Era la primera vez que la Iglesia se manifestaba en contra de Copérnico, desde la publicación de su libro en 1543. En esta condena se adelantó Lutero (1483-1546). Galileo finalmente regresó a Florencia, tras fracasar en su intento de convencer a sus ya numerosos enemigos, pero con una carta de Belarmino donde se explicitaba que el científico no había sido condenado.

LA CONDENA

A su regreso a Florencia, los problemas de salud y la artritis de Galileo se recrudecieron. Alquiló la villa Bellosguardo, próxima a Florencia, que constituiría su lugar de residencia durante los si-

AMONESTACIÓN, NO CONDENA

Galileo quiso que quedara bien claro que no había sido condenado por la Iglesia en 1616. Por ese motivo pidió a Belarmino que le escribiera una carta en la que se expusiera claramente que no había existido condena contra él. La carta escrita por Belarmino fue la siguiente:

> Nos, Roberto Cardenal Belarmino, habiendo oído que se propala la calumnia de que el señor Galileo Galilei ha abjurado en nuestra presencia y que se le ha impuesto una penitencia saludable, y habiendo sido requerido para manifestar la verdad, declaramos que el susodicho señor Galileo no ha abjurado ni en nuestras manos ni, que nosotros sepamos, en las de ninguna otra persona de Roma o de ningún otro lugar de ninguna opinión o doctrina por él sostenida, ni se le ha impuesto ninguna penitencia saludable; sino que tan solo se le ha comunicado la declaración hecha por el Santo Padre y promulgada por la Sagrada Congregación del Índice, en la que se da a conocer que la doctrina atribuida a Copérnico que la Tierra se mueve alrededor del Sol y que el Sol está inmóvil en el centro del mundo y que no se mueve de oriente a occidente es contraria a las Sagradas Escrituras y, por consiguiente, no se la puede sostener o defender. En fe de lo cual hemos escrito y suscrito la presente de propia mano, el 26 de mayo de 1616.

guientes catorce años. Esta villa se encontraba próxima a Arcetri, en cuyo convento vivían sus dos hijas, sor Maria Celeste y sor Arcángela. Galileo y Maria Celeste estaban muy unidos, y existe una profusa correspondencia entre ambos.

Después de la advertencia, Galileo abandonó sus escarceos con el copernicanismo, por lo menos durante los primeros años (aunque no tenía claro si se le había prohibido categóricamente referirse a este tema). En su lugar se dedicó al estudio de diferentes fenómenos, como los imanes, sobre los que sentía una enorme curiosidad. Sin embargo, el problema de la concepción del mundo era recurrente. Por ejemplo, en 1618 la irrupción de unos cometas forzó de nuevo a las múltiples interpretaciones, tanto de aristotélicos como de partidarios de Tycho Brahe. Fruto de esta polémica Galileo escribió *El ensayador* (1623), obra en la que se enzarzaba en otra polémica con el jesuita Orazio Grassi (1583-1654). En esta discusión, Galileo cayó en el gran error de

creer que los cometas eran una ilusión óptica, mientras que para Grassi se trataba de astros reales. El intercambio postal entre partidarios de unos y de otros fue subiendo de tono y entre otros ataques, Grassi se atrevió a escribir alguna amenaza velada: «No resulta seguro para un hombre piadoso afirmar el movimiento de la Tierra».

En *El ensayador*, además del error sobre los cometas, Galileo se refirió a la importancia de la experiencia directa, no de la autoridad, como tribunal para decidir sobre cómo funciona el mundo. Seguidamente añadió este conocido pasaje:

> La filosofía está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir, el universo, pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres con que está escrito. Está escrito en lengua matemática y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto.

En esta obra Galileo no hizo referencia al copernicanismo. Sin embargo, sí que expuso otra doctrina sumamente polémica y que de nuevo le enfrentaba a Aristóteles e indirectamente a la Iglesia. Se trataba de la hipótesis atómica, que se oponía al hilemorfismo aristotélico (concepción según la cual la realidad se compone de materia y de forma). Se trataba de un argumento añadido para sus enemigos, entre cuyas filas, a partir de ese momento, había que contar también a los jesuitas, dado que Grassi era uno de sus líderes.

En 1620 moría Cosme II de Médicis, quien había sido su mecenas. Al año siguiente moría también su amigo Sagredo, de sus tiempos venecianos. Igualmente en 1621 murió el papa Pablo V (1550-1621), al que le sucedió, por un período muy breve, Gregorio XV (1554-1623), tras cuya repentina muerte se nombró a Maffeo Barberini (1568-1644), que pasó a ser el papa Urbano VIII. Cuando era cardenal, Barberini había sido un gran amigo de Galileo, que había celebrado sus descubrimientos científicos y lo consideraba como un hermano. Todo parecía presagiar que los



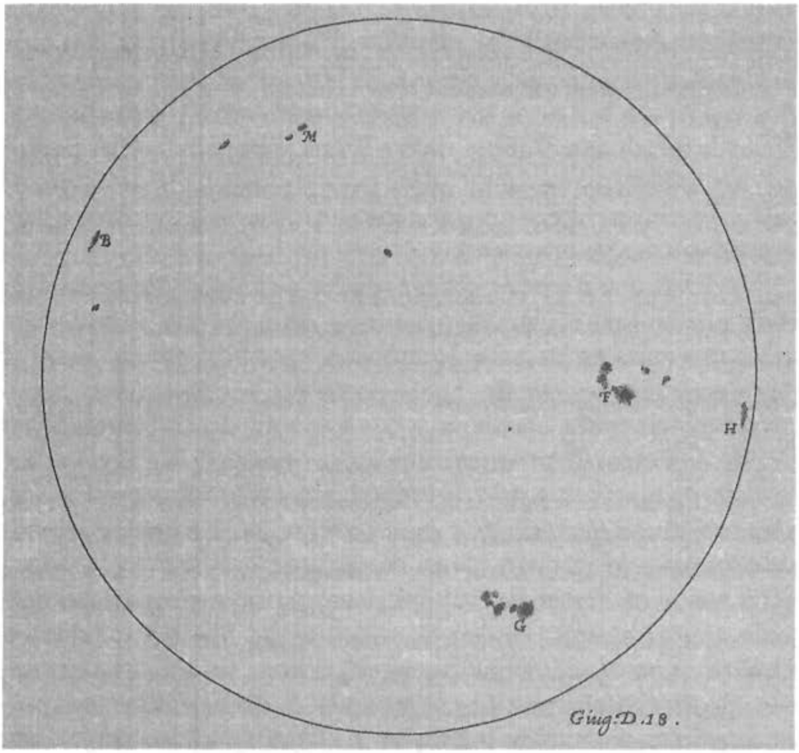


FOTO SUPERIOR:
Galileo tuvo que enfrentarse en dos ocasiones con la Inquisición. La primera en 1616, cuando fue acusado de hereje por defender el copernicanismo; se saldó con una amonestación. La segunda, que tuvo lugar en 1633, está recreada en este cuadro de Robert Fleury (1847); en ella se repitió la acusación, pero esta vez la condena se hizo efectiva.

FOTO INFERIOR:
Uno de los argumentos que Galileo esgrimió para cargar contra la inmutabilidad de los cielos aristotélica fue el avistamiento de manchas solares, a cuya explicación dedicó la obra *Historia y demostraciones en torno a las manchas solares* (1613), que contaba con ilustraciones explicativas realizadas por el mismo Galileo, como la que aquí se muestra.

tiempos de conflicto y enfrentamiento con la Iglesia habían llegado a su fin. En realidad los problemas no habían hecho nada más que empezar.

En 1624 Galileo decidió viajar de nuevo a Roma para presentar los honores al nuevo papa y conseguir que anulara el edicto de 1616. El papa no accedió a la anulación, pero sí que permitió que Galileo hiciera referencia como mera hipótesis al movimiento de la Tierra y su doctrina de las mareas. En estas conversaciones, Galileo se convenció —seguramente de forma precipitada— de que la Iglesia, con el nombramiento del nuevo papa, había relajado su posición respecto al copernicanismo.

EL «DIÁLOGO»

Desde 1624 hasta 1630, Galileo se dedicó a redactar la que sería una de las cimas literarias, tanto de la literatura italiana como de la filosofía, así como de la ciencia. Se trataba del *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, ptolemaico y copernicano*. Una vez terminada, Galileo viajó a Roma para solicitar los permisos necesarios para su impresión. Los censores revisaron y suprimieron pasajes para concederle los permisos de impresión, como finalmente acabó ocurriendo.

Parecía que los principales escollos se habían superado y no iba a presentarse ningún otro contratiempo. Entonces Galileo recibió una carta en la que se le animaba a publicar cuanto antes el libro «por razones que no quiero poner por escrito», decía la misiva. Se le animaba asimismo a que lo publicara en Florencia en vez de en Roma. Era evidente que los enemigos de Galileo habían empezado a actuar, y uno de sus más importantes valedores, Federico Cesi, su gran aliado y protector en Roma y fundador de la Academia de los Linces, había muerto en 1630. El libro se acabó publicando en Florencia en 1632, pero en pocos meses fue prohibido. Sería, además, el desencadenante del juicio y condena a Galileo.

El libro estaba escrito en forma de un diálogo entre tres personas, Salviati, Sagredo y Simplicio, que durante cuatro días de-

LAS VICISITUDES DE LA PUBLICACIÓN

Galileo daba tanta importancia al argumento sobre las mareas que pensó poner por título a su obra precisamente *Diálogo sobre las mareas.* Los censores lo forzaron a cambiar el título porque exigían que se reflejara el pretendido tratamiento imparcial tanto del geocentrismo como del heliocentrismo. En una carta, Galileo expuso estos problemas que se encontró para imprimir la obra:

> Es cierto que no he conseguido que en el título del libro se me permitiera mencionar el flujo y reflujo del mar, aunque este sea el argumento principal que trato en la obra. Pero se me ha concedido que proponga los dos máximos sistemas, ptolemaico y copernicano, diciendo que examino ambos, aportando a una y otra parte todo lo que puede decirse, dejando después el juicio en suspenso. Creo que si el libro se hubiera titulado «del flujo y reflujo» habría sido más ventajoso para el impresor. Pero después de algún tiempo se correrá la voz por medio de los primeros que lo habrán leído.

Para que fuera publicado, el tribunal de la Inquisición requirió hacer numerosos cambios. El papa, además, exigió que se introdujera un argumento nuevo al final de la obra. Galileo finalmente puso el argumento en boca de Simplicio, lo que ocasionó la furia papal:

> Si se os interrogara a ambos respecto a si Dios con su infinito poder y sabiduría podría conferir al elemento agua el movimiento recíproco que percibimos en él [se refiere a las mareas], de un modo distinto a hacer mover el recipiente que la contiene, sé, insisto, que responderías que habría podido y sabido hacerlo de muchas maneras, incluso inconcebibles por nuestro intelecto. Por lo que yo concluyo inmediatamente que siendo así, sería soberbia osadía si uno quisiera limitar y coartar la potencia y sabiduría divina a una determinada.

batían sobre las dos concepciones rivales del mundo. Salviati representaba la opinión de Galileo, la posición científica y matemática, basada en experimentos y hechos. Su interlocutor era Simplicio, personaje seguidor de Aristóteles y que se inspiraba en Colombe. Sagredo, por último, representaba la persona imparcial, que escogía los mejores argumentos empleados por ambos interlocutores. El lugar donde tenía lugar esta conversación imaginaria era el palacio de Sagredo en Venecia, donde tantas conversacio-

nes había mantenido Galileo junto a su amigo décadas atrás. El *Diálogo* es, entre otras cosas, un inmenso homenaje a sus dos amigos ya muertos.

Con esta obra, Galileo pretendió examinar todas las razones existentes que servían para apoyar estos dos sistemas del mundo. Se trataba de poner en una balanza hechos y argumentaciones, dejando fuera oscuros razonamientos y apelaciones a la autoridad. En el diálogo hay siempre un claro vencedor, Salviati, que supera siempre dialécticamente y con argumentos más firmes al representante aristotélico. Sin embargo, Galileo quiso guardar las apariencias desde el inicio afirmando explícitamente que ha tenido en cuenta la teoría copernicana «considerándola como pura hipótesis matemática». En el título completo además se añade lo siguiente: «Donde en las conversaciones de cuatro jornadas se discurre sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano proponiendo de modo neutral las razones filosóficas y naturales tanto de una como de otra parte». A pesar del título, a cualquier lector le podía quedar meridianamente clara la superioridad del heliocentrismo, mientras que la posición geocéntrica defendida por Simplicio quedaba constantemente puesta en evidencia y ridiculizada.

FRENTE A LA INQUISICIÓN

Cuando la obra llegó a Roma, provocó una gran polémica y escándalo. Enemigos acérrimos de Galileo, como Scheiner o Grassi, proclamaron su indignación contra el libro y su autor. Al cabo de tantos años y polémicas, los enemigos de Galileo encontraron la ocasión propicia para atacarlo. Incluso el papa Urbano VIII pasó a alinearse en las filas de los adversarios de Galileo cuando se dio cuenta de que el argumento que le había exigido que introdujera en la conclusión del libro para aceptar su publicación lo había puesto en boca de Simplicio. Era fácil que el papa se acabara convenciendo de que la figura de Simplicio en realidad se inspiraba en su propia persona. Para Urbano VIII, Galileo había hecho mofa de él y lo había satirizado, y esa ofensa

—posiblemente inintencionada— el papa se la haría pagar con creces.

Todos los libros fueron requisados y al editor se le prohibió imprimirlo de nuevo. Fue una sorpresa para Galileo, que se había sometido a todas las exigencias, revisiones y cambios que las autoridades le habían exigido para concederle los permisos de impresión. Cuando amigos de Galileo intercedieron frente al papa, este les señaló que Galileo lo había engañado.

«Estoy en vuestras manos, haced lo que queráis conmigo.»

— Galileo ante el tribunal de la Santa Inquisición.

La maquinaria inquisitorial se había puesto en funcionamiento por la publicación de un libro que, en realidad, había superado todos los trámites y había aceptado publicar. En Florencia, la Inquisición le comunicó a Galileo que estaba siendo investigado, y a finales de 1632, el papa inquirió a Galileo que se dirigiera a Roma, viaje que el anciano y enfermo científico, que ya contaba con la edad de sesenta y ocho años, tuvo que retrasar hasta principios de 1633.

En la acusación se señaló que Galileo había incumplido la orden expresa de 1616 de no hablar del sistema copernicano. Fue sometido a duros interrogatorios hasta que finalmente se le obligó a confesar, con la amenaza de que de lo contrario sería torturado. Galileo finalmente claudicó.

Su confesión sirvió como prueba suficiente para emitir un veredicto de culpabilidad. El papa exigía que fuese sometido a un castigo ejemplar, para impedir que otros siguieran su ejemplo, consistente en la prisión a perpetuidad. No se conformó con el veredicto, sino que además se tenía que hacer público. El 22 de junio, en el convento de Santa Maria sopra Minerva, se le leyó la sentencia, en la que se le declaraba «gravemente sospechoso de herejía», y Galileo leyó una abjuración dictada por el papa. Se dio una gran publicidad a la sentencia para hacer más humillante la derrota de Galileo. Todas sus obras fueron inscritas en el *Índice de libros prohibidos*. Después de la humillación, el papa decidió

finalmente conmutar la pena de prisión por el arresto domiciliario a perpetuidad. Este proceso causó una gran conmoción en el científico.

«*Eppur si muove* (Y sin embargo se mueve).»

— **Frase que, supuestamente, pronunció Galileo tras su abjuración ante el Tribunal de la Inquisición.**

VIDA RETIRADA

Galileo fue retenido en un principio en el palacio arzobispal de Siena, donde recibió numerosos cuidados. Finalmente consiguió que se le condujera a Arcetri, cerca de Florencia, donde se encontraba el convento de sus hijas. El destino, sin embargo, tenía que depararle otro duro golpe: su hija favorita, sor Maria Celeste, moría en 1634, a la edad de treinta y tres años. La vejez y el aislamiento al que le había sometido la Inquisición, sumado a la muerte de su hija, parecía que iba a dar al traste con todos los proyectos que aún animaban al científico. Sin embargo, tuvo fuerzas para abordar su proyecto más ambicioso, la fundamentación de la nueva ciencia del movimiento, un proyecto que tenía en mente desde décadas atrás, y que finalmente podría ver a luz.

En 1636 pudo dar por terminado su *Discursos y demostraciones matemáticas, en torno a dos nuevas ciencias*. Debido a la prohibición que había recaído sobre sus obras, que afectaba a todos los países católicos, se vio obligado a enviar su manuscrito a los Países Bajos para su publicación, con el consiguiente enfado de los jesuitas, que vieron burlada la condena. En una visita, el filósofo inglés Thomas Hobbes (1588-1679) le informó de que ya circulaban copias en inglés de esta obra fundamental. En 1638 también recibió la visita del poeta John Milton (1608-1674), encuentro que se plasmaría por ejemplo en su *Areopagítica*, donde hace una encendida defensa de la libertad de expresión y en contra de la censura.

En 1637 Galileo aún tuvo tiempo de realizar un último descubrimiento científico: el movimiento de libración de la Luna. Fue su







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Galileo vivió su arresto domiciliario en Arcetri, cerca de Florencia y del convento donde se encontraban sus dos hijas. Anciano y enfermo, pudo compartir algunos momentos con su hija sor Maria Celeste, aunque ella murió tan solo un año después. El grabado procede de la obra de Gaston Tissandier *Les Martyrs de la Science* (1882).

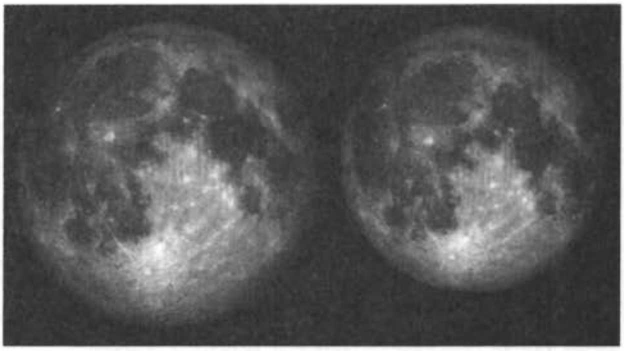
FOTO SUPERIOR DERECHA:
Detalle del monumento funerario de Galileo en la basílica de la Santa Cruz de Florencia, erigido por Giovanni Battista Foggini. Preside el conjunto un busto del científico, cuya mano derecha porta un telescopio, mientras que la izquierda reposa en un globo situado sobre unos libros.

FOTO INFERIOR:
Vincenzo Viviani y Galileo en una pintura realizada por Tito Lessi en 1892. Discípulo de Galileo, Viviani lo acompañó en su arresto domiciliario desde 1639 hasta su muerte, y se convertiría en su primer biógrafo.

LA LIBRACIÓN

Normalmente, solo se puede ver iluminada una cara de la Luna, y resulta que siempre es la misma debido a la coincidencia entre su período de rotación y de traslación. Esto significa que, en teoría, solo es posible ver exactamente la mitad de la superficie lunar. Sin embargo, un observador paciente apreciará que en realidad desde la Tierra es posible avistar hasta el 59 % de la superficie lunar, debido a que algunas regiones que se encuentran en la penumbra en ciertos momentos se hacen visibles. Este fenómeno se debe a unos movimientos llamados *libraciones*, término que etimológicamente hace referencia a la libra, es decir la balanza, y que alude a un movimiento de cabeceo del eje. Las libraciones se producen debido a una combinación de sucesos. Por un lado, el eje de la Luna está inclinado con respecto al plano que forma con la Tierra, de modo que su movimiento ya genera variaciones. Por otro, la órbita de la Luna es elíptica y en el punto más lejano (apogeo) nuestro satélite se mueve a menos velocidad que en el más cercano (perigeo), de modo que unas veces su rotación se atrasa y otras se adelanta con respecto a su posición orbital en torno a la Tierra. Por último, la Luna tiene, además, un movimiento de cabeceo. Galileo describió el fenómeno de la libración en los siguientes términos (mostrando, a su vez, que se había percatado de la combinación de movimientos que lo explican):

> He observado un aspecto maravilloso de la superficie lunar. Aunque millones de hombres la han mirado millones de veces, creo que ninguno ha observado el mínimo cambio de su superficie, sino exactamente la misma cara que siempre se ha supuesto que se presenta ante nuestros ojos. Ahora veo que no es así, sino todo lo contrario, que cambia de aspecto, como si alguien que mirándonos de frente ladeara un poco la cara, primero a la derecha y después a la izquierda, o la alzara y luego la bajara y finalmente la inclinara.



Imágenes de la Luna en su perigeo (izquierda) y en su apogeo. Al comparar, entre ambas fotografías, la situación de algunos accidentes geográficos del satélite, se observa que no siempre muestra exactamente la misma superficie.

última aportación a la ciencia, dado que al año siguiente perdería la vista.

En una carta Galileo explicaba a un amigo su situación durante los últimos años de su vida:

> Tu querido amigo y servidor Galileo lleva un mes completamente ciego, de modo que ese cielo, esa Tierra y ese universo que con mis maravillosos descubrimientos y claras demostraciones he ampliado cien mil veces más allá de lo que creían los sabios de épocas pasadas, a partir de ahora se ha encogido para mí en un espacio tan reducido como el que llenan mis propias sensaciones corporales.

En 1639, Vincenzo Viviani, un discípulo suyo, fue a vivir a su casa y se convertiría en su primer biógrafo. Galileo falleció el 8 de enero de 1642, el mismo año en que nació Isaac Newton.

Anexo

MASA Y GRAVEDAD

Galileo anticipó que un experimento como el realizado por los astronautas estadounidenses con el martillo y la pluma tendría como resultado que ambos cuerpos caerían a la vez. Mediante sus experimentos del plano inclinado estudió la caída de los cuerpos hasta percatarse de que la velocidad que alcanzaban las bolas solo dependía de la altura, no del peso. Se basó, por tanto, en datos empíricos, pero no se aventuró a explicar las causas de este fenómeno (por sistema se abstenía de referirse a elucubraciones sin fundamento), puesto que no tenía suficientemente elaboradas las herramientas matemáticas para mostrar esa independencia de la masa con respecto a la velocidad de los cuerpos al caer por otras vías.

A partir de los principios de Newton es posible demostrar matemáticamente que la velocidad que alcanza un objeto en caída libre depende exclusivamente de la gravedad y no de su masa. Y también es posible calcular la aceleración de la gravedad en cada planeta y en cada satélite una vez conocidos su radio y su masa.

Según Newton, entre dos masas cualesquiera se produce una fuerza de atracción. Gracias a su ley de la gravitación universal fue capaz de calcular dicha fuerza, y estableció que tenía que ser directamente proporcional a la masa de los dos cuerpos implica-

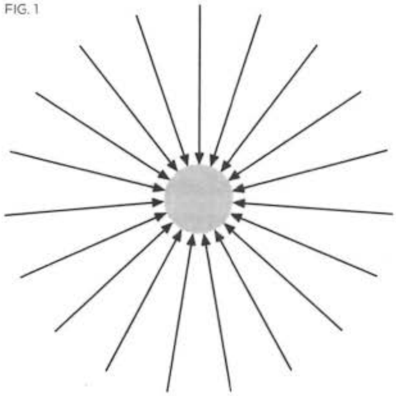
dos (m_1 y m_2) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos cuerpos (d). Según esto, la ley de gravitación universal afirma lo siguiente:

$$F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{d^2},$$

donde G es la constante de gravitación universal, cuyo valor es $6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$.

En lugar de referirnos a la interacción de dos masas, vamos a suponer que hay un único cuerpo que no interacciona con nada más. En ese caso, aunque no influya directamente sobre ningún otro cuerpo, se supone que a su alrededor está creando un campo de influencia, de tal modo que en el caso de que otro cuerpo se aproximara a dicho campo, inmediatamente se vería afectado por él. Este campo gravitatorio se puede representar mediante unas líneas cuyo sentido será siempre de atracción y, por tanto, dirigidas al mismo cuerpo (figura 1).

FIG. 1



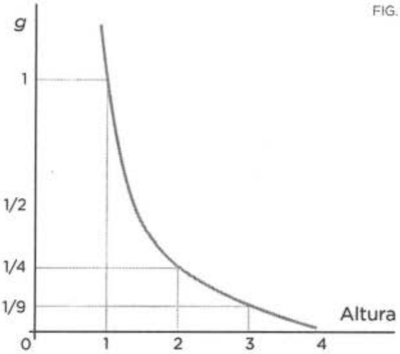


FIG. 2

El valor del campo gravitatorio también se puede calcular del modo siguiente:

$$g = G\frac{m_1}{d^2}. \qquad [1]$$

Es decir, con esta ecuación sabemos cómo se verá afectada cualquier masa m_2 que se sitúe a cierta distancia del primer cuerpo. Para ello, solo será necesario calcular: $F = m_2 \cdot g$.

Si observamos la ecuación del valor del campo gravitatorio, veremos que al aumentar la distancia del centro de la masa que crea dicho campo, disminuye su intensidad. Se puede observar la disminución de la gravedad con la altura con ayuda de un gráfico (figura 2).

Si en la fórmula [1] sustituimos los valores por la masa correspondiente a la Tierra y como distancia se toma la del radio medio terrestre:

— Masa Tierra: $M_T = 5{,}9736 \cdot 10^{24}$ kg,

— Radio Tierra: $d = 6\,371$ km $= 6{,}371 \cdot 10^6$ m,

se obtiene el siguiente resultado:

$$g = G\frac{M_T}{d^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2} \cdot \frac{5{,}9736 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}}{(6{,}371 \cdot 10^6)^2\ \mathrm{m}^2} = 9{,}81\ \mathrm{m/s}^2.$$

Es decir, a nivel del mar todos los cuerpos se ven afectados por la misma aceleración (9,81 m/s^2).

Con la misma fórmula también podríamos calcular la intensidad del campo gravitatorio en la cima de una montaña y mostrar el porcentaje de disminución de dicho valor en relación con la altura. Con respecto a la Luna también se puede realizar el mismo cálculo:

— Masa Luna: $M_L = 7{,}349 \cdot 10^{22}$ kg,

— Radio Luna: $1{,}738 \cdot 10^6$ m,

$$g = G\frac{M_L}{d^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2} \cdot \frac{7{,}349 \cdot 10^{22}\ \mathrm{kg}}{(1{,}738 \cdot 10^6)^2\mathrm{m}^2} = 1{,}62\ \mathrm{m/s}^2.$$

De este modo obtenemos el valor de la aceleración para la Tierra y para la Luna. Conociendo el radio y la masa de cualquier planeta o satélite será posible calcular la aceleración de la gravedad. Cuanto más masivo y denso sea un planeta, mayor será este

valor, que determina la aceleración a la que caerán todos los objetos. El campo gravitatorio también determina la velocidad que un cuerpo necesita alcanzar para liberarse de su influencia y alejarse de un planeta o un satélite.

CAÍDA LIBRE Y ENERGÍA

Las leyes de la cinemática calculan posiciones y velocidades en caída libre con independencia de la masa. Al usar las nociones de energía cinética (E_c, asociada a la velocidad) y energía potencial (E_p, asociada a la altura) para calcular la velocidad que alcanza un cuerpo en caída libre, de nuevo se puede comprobar que dicha velocidad es independiente de su masa, y solo depende de la altura a la que se encuentre:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h.$$

Cuando una bola se sostiene a cierta altura del suelo, tiene energía potencial, que, al caer, se transformará en energía cinética. De modo que para saber la velocidad que alcanzará el cuerpo en el momento en que impacta con el suelo (cuando toda la energía potencial se habrá transformado en energía cinética) lo haremos como sigue:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m v^2.$$

Al aislar la velocidad se obtiene el resultado que se refleja a continuación:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}.$$

Es decir, vemos que la velocidad final que alcanza el cuerpo es independiente de la masa.

VELOCIDAD DE ESCAPE

De nuevo si se quiere calcular la velocidad de escape, es decir, la velocidad que tiene que alcanzar un cohete o cualquier cuerpo para zafarse de la influencia de la gravedad, se puede llevar a cabo de la siguiente manera. Se parte de la energía potencial gravitatoria, que se define a partir de la siguiente expresión:

$$E_p = G\frac{M_T \cdot m}{d}.$$

Se usa M_T para referirse a la masa de la Tierra, pero se usaría la misma expresión para hacer el cálculo con la masa de cualquier otro planeta o satélite. La energía cinética, por su parte, es igual a:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2.$$

El cohete tiene que alcanzar la velocidad suficiente para que su energía cinética sea igual o superior a la energía potencial que ejerce el planeta:

$$\frac{1}{2} m v^2 = G\frac{M_T \cdot m}{d}.$$

Por tanto, la velocidad de escape se expresará del modo siguiente:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M_T}{d}}.$$

De nuevo se comprueba que dicha velocidad es independiente de la masa del cuerpo y siempre es la misma (aunque si el cuerpo es más masivo, se tendrá que invertir más energía para que alcance dicha velocidad).

LA ATMÓSFERA Y EL ROZAMIENTO

La atmósfera terrestre es la responsable de la resistencia que sufren los cuerpos al caer, es decir, la que hace que los cuerpos acaben cayendo a distintas velocidades. Si tenemos dos bolas del mismo material, la que pese más llegará antes al suelo, y solo en el vacío ambas caerán simultáneamente, como Galileo pronosticó.

La resistencia del aire actúa como una fuerza cuyo sentido es contrario al avance del cuerpo. En el caso de la caída libre, se opone a la fuerza de gravedad. En esa propia resistencia se encuentra también la clave de que vuelen y se sostengan en el aire los aviones o las cometas (aunque, como se verá a continuación, las alas de los aviones utilizan otros fenómenos y principios aerodinámicos). Sería el equivalente a la resistencia que ejerce el suelo cuando se intenta mover un objeto muy pesado.

El aire está compuesto por moléculas de agua, oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono, entre otros gases. Para que un objeto caiga, dichas moléculas deben ser apartadas. Cuanto mayor sea el objeto que cae y menor sea su peso, con más lentitud se apartarán para dejarlo pasar, de modo que su descenso será más lento.

La forma y la superficie frontal del objeto que cae son factores que también influyen en la velocidad que alcanza el cuerpo. En el caso de una hoja de papel, tanto el peso como la superficie que ocupa contribuyen a que permanezca flotando más tiempo, y, por el contrario, una bola de acero caerá a toda velocidad. En planetas o satélites sin atmósfera, la ausencia de moléculas que entorpezcan el camino de los objetos que caen hace que su forma o su peso sean factores irrelevantes.

EL ROZAMIENTO Y EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD

Cuando se trata de objetos que caen a poca distancia del suelo, la influencia de la resistencia del aire suele ser despreciable, es decir, no se tiene en cuenta al hacer los cálculos. Pero cuando la altura es considerable, es necesario introducir la influencia de la resistencia aerodinámica.

El rozamiento es una fuerza opuesta a la gravedad. Cuando la velocidad alcanzada por el objeto en su caída es pequeña (por ejemplo, al arrojarlo desde escasa altura), en ese caso la fuerza de rozamiento es proporcional a la velocidad. Es decir, a mayor velocidad del cuerpo, mayor será la resistencia del aire, y esta relación será directamente proporcional.

En el caso de cuerpos que alcanzan grandes velocidades, la resistencia pasa a incrementarse con el cuadrado de dicha velocidad. Este incremento se debe a que al aumentar la velocidad se generan remolinos de aire que contribuyen a reforzar la acción de la resistencia.

Este fenómeno también se tiene que tener en cuenta a la hora de fabricar automóviles, dado que la resistencia del aire es un factor determinante (por esa razón, a la hora de diseñar los automóviles, se hacen numerosas pruebas para conseguir que el vehículo sea lo más aerodinámico posible). Cuando la velocidad se duplica, la resistencia del aire se torna cuatro veces mayor, y si se triplica, es nueve veces mayor. Esto obliga a que, cuando se quieren desarrollar automóviles muy rápidos, hay que dotarlos de un motor muy potente.

Expresado matemáticamente, la acción conjunta de la fuerza de la gravedad y el rozamiento ofrece el siguiente resultado:

$$m\,g - F_R = m\,a,$$

donde mg es el peso del objeto afectado por la fuerza de la gravedad correspondiente. La fuerza de rozamiento, F_R, como se ha señalado, es proporcional a la velocidad al cuadrado y depende de varios factores que se subsumen bajo la constante:

$$F_R = k\,v^2.$$

Tal como se ha dicho, k depende de factores como la forma del objeto, la resistencia del aire o la superficie frontal que se opone al aire. Para calcular este valor se emplea la expresión:

$$k = f \cdot k_W \cdot S,$$

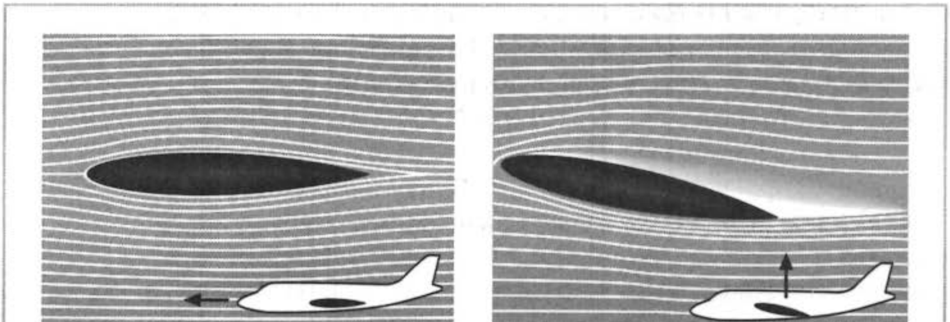
donde *f* es un factor de 0 a 1 que depende de la forma del cuerpo (el valor 1 corresponde a un cuerpo cuya superficie es totalmente plana; cuanto más aerodinámico sea el cuerpo, menor será este valor); k_w es un factor de la resistencia del aire, que es igual a $0{,}6\,\mathrm{N \cdot s^2/m^4}$, y, por último, *S* hace referencia a la superficie del cuerpo que roza con el aire.

¿POR QUÉ VUELAN LOS AVIONES?

En la resistencia del aire se encuentra la clave para entender por qué vuelan los aviones. De la misma manera que moviendo los brazos en la forma adecuada flotamos en el agua, los aviones aprovechan algunos factores del medio para «flotar» en el aire, aunque en el caso del aire intervienen otros fenómenos, entre los que destaca el *efecto Venturi* o el *teorema de Bernoulli*.

En un avión, cuando el ala está horizontal, la presión que el aire ejerce en ella, tanto en la parte inferior como en la superior, es la misma. Sin embargo, cuando el ala se inclina ligeramente, la presión del aire es mucho mayor en la parte inferior que en la superior, lo que permite que el avión se eleve.

Las alas de los aviones están diseñadas para que el aire circule más rápidamente por la parte superior del ala que por la inferior, aprovechando así el llamado efecto Venturi, según el cual los fluidos, al pasar por un estrechamiento, aumentan su velocidad. En combinación con el efecto Venturi, el teorema de Bernoulli afirma que al aumentar la velocidad de un fluido, disminuye la presión. Por este motivo, la presión es mayor en la parte inferior del ala que en la superior. Como resultado de estas presiones combinadas, el avión acaba ascendiendo.



Lecturas recomendadas

AA.VV., *Galileo y su legado*, Barcelona, Prensa científica, 2010.

—: *Galileo Galilei, La nueva ciencia del movimiento*, Barcelona, UAB, 1988.

DRAKE, S., *Galileo: a very short introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2001.

FERRIS, T., *La aventura del universo*, Barcelona, Crítica, 2007.

GALILEI, G., *La gaceta sideral. Conversación con el mensajero sideral*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

—: *Carta a Cristina de Lorena y otros textos sobre ciencia y religión*, Madrid, Alianza Editorial, 2006.

—: *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, Buenos Aires, Losada, 2003.

—: *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, Madrid, Alianza Editorial, 2011.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Alianza Editorial, 2007.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

KRAGH, H., *Historia de la cosmología*, Barcelona, Crítica, 2008.

VAQUERO, J.M., *Galileo. La nueva física*, Madrid, Nivola, 2003.

Índice